

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«На правах  
рукопису» УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Анатолій Орлов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності: \_\_\_\_\_ 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: Процеси утворення мікрорельєфної поверхні та їх вплив на оптичні і фотоелектричні властивості напівпровідників

Виконав: студент 2 курсу, групи ДП-91мн  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Самусь Олександр Станіславович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник: \_\_\_\_\_ доцент, к.ф.-м.н., Свєчніков Г.С.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю: \_\_\_\_\_ доц.,к.ф.-м.н., Свєчніков Г.С. \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань: \_\_\_\_\_ доц.. к.т.н., Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2021 року

## Завдання на дипломний проект, дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет: \_\_\_\_\_ Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра: \_\_\_\_\_ Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність (спеціалізація): 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій Орлов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ на магістерську дисертацію студенту Самусю Олександрю Станіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Процеси утворення мікрорельєфної поверхні та їх вплив на оптичні і фотоелектричні властивості напівпровідників

керівник дисертації: \_\_\_\_\_ доцент, к.ф.-м.н., Свечніков Г.С. \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації: \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження : Мікрорельєфна морфологія поверхні напівпровідників

4. Предмет дослідження: Оптичні і фотоелектричні характеристики анізотропно труючої поверхні напівпровідників

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Проаналізувати причини і механізми розвитку мікрогеометрій. 2) Дослідити морфологічні особливості мікрорельєфних поверхонь напівпровідників. 3) Дослідити оптичні спектри

напівпровідників з мікрорельєфними поверхнями. 4) Якісно оцінити роль поверхневих станів в оптичних і фотоелектричних характеристиках.

6 Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Модель мікрорельєфної поверхні, результати досліджень, висновки,

7. Орієнтовний перелік публікацій: \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів проекту (роботи)\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Основні умови виникнення мікрорельєфу напівпровідників ( огляд літератури)		
2.	Дослідження оптичних властивостей мікрорельєфу		
3.	Дослідження фотоелектричних властивостей мікрорельєфу		
4.	Аналіз результатів досліджень		
5.	Оформлення магістерської дисертації		

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Самусь О.С.  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Свєчніков Г.С.  
(ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## РЕФЕРАТ

Роботу виконано на 81 сторінці, вона містить 3 розділи, 32 ілюстрації, 3 таблиці, і 28 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є мікрорельєфна морфологія поверхні напівпровідників.

Предметом дослідження є оптичні і фотоелектричні характеристики анізотропно труєної поверхні напівпровідників.

Метою роботи є аналіз мікроморфології поверхні напівпровідників для вивчення її впливу на оптичні характеристики.

У першому розділі були вивчені основні положення формування мікрорельєфу напівпровідників IV групи і сполук  $A^{III}B^V$  за допомогою анізотропного травлення.

У другому розділі розглянуто оптичні характеристики мікрорельєфу анізотропно труєних поверхонь.

У третьому розділі досліджено характеристики фотопровідності напівпровідників з мікрорельєфною поверхнею.

Ключові слова : МІКРОРЕЛЬЄФ, АНІЗОТРОПНЕ ТРАВЛЕННЯ, МОРФОЛОГІЯ ПОВЕРХНІ.

## ABSTRACT

The work is done on 81 pages, it contains 3 sections, 32 illustrations, 3 tables, and 28 references in the list of references.

The object of research is the moth-eye morphology of the semiconductor surface.

The subject of research is the optical and photoelectric properties of anisotropically etched semiconductor surfaces.

The aim of this work is to analyze the micromorphology of the semiconductor surface to study its effect on optical characteristics.

In the first chapter, the main provisions of the formation of the microrelief of group IV semiconductors and  $A^{III}B^V$  compounds using anisotropic etching were studied.

In the second section, the optical characteristics of the microrelief of anisotropically etched surfaces are considered.

In the third section, the characteristics of the photoconductivity of semiconductors with a moth-eye surface are investigated.

Key words: MICRORELIEF, ANISOTROPIC ETCHING, SURFACE MORPHOLOGY.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	4
ABSTRACT .....	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП.....	9
1. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ НАПІВПРОВІДНИКІВ .....	11
1.1 Передумови формування мікрорельєфу.....	11
1.2 Дослідження виникнення мікрорельєфу в Si.....	25
1.3 Дослідження виникнення мікрорельєфу в Ge .....	30
1.4 Дослідження виникнення мікрорельєфу в GaAs .....	32
2. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МІКРОРЕЛЬЄФУ АНІЗОТРОПНО ТРАВЛЕНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКІВ.....	37
2.1 Оптична модель мікрорельєфу поверхні.....	37
2.2 Спектри відбиття і пропускання при $h \gg \lambda$ .....	45
2.3 Кутова структура розсіяного випромінювання. ....	53
2.4 Спектральний розподіл пропускання. ....	54
2.5 Спектри відбиття і пропускання при $h \leq \lambda$ .....	57
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРОВІДНОСТІ В НАПІВПРОВІДНИКАХ ІV ГРУПИ І $A^{III}B^V$ НАПІВПРОВІДНИКАХ З АНІЗОТРОПНО ТРАВЛЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ.....	61

3.1	Фотоефект в Si p <sup>+</sup> -n структурах.....	61
3.2.	Фотоефект в структурах фоторезисторів на A <sup>III</sup> B <sup>V</sup> напівпровідниках.....	69
3.3.	Оцінка рекомбінаційних параметрів з спектрального розподілу фотопровідності.....	73
ВИСНОВКИ.....		77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ: .....		78

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АТ – анізотропне травлення

ДП – дискретний прилад

ІС – інтегральна схема

$R_0$  - відбиття плоскій поверхні,

$h$  - середньоквадратичні значення висоти

$m$  - середньоквадратичні значення

$\beta$  - половина апертури

$\theta$  - азимутальний кут



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Одним з нових науково-технічних і науково-технологічних напрямків, який забезпечив досягнення мікроелектроніки і оптоелектроніки останнього десятиліття, є методи локального зміни структури, мікрогеометрії і властивостей напівпровідників і, перш за все, локального видалення матеріалу. Локальне видалення матеріалу напівпровідника - процес зворотний кристалізації - використовує анізотропію властивостей матеріалу, а саме, анізотропію швидкостей травлення поверхонь монокристалів, і дозволяє декристалізувати його будову в природних структурно-геометричних формах.

Структурно-геометричні мікроморфології монокристалів (мікрорельєф), притаманні процесам анізотропного травлення (АТ), і неплоскі (мікрорельєфні) кордони розділу з програмованим профілем р-п-, гомо- та гетеропереходів робить істотний вплив на їх якість, властивості і характеристики, призводять до специфічних нових властивостей, через які інтерес до таких структур значно зростає. Це диктується з одного боку практичними вимогами поліпшення характеристик структур, з іншого боку, розумінням фізичних явищ і процесів на неплоских межах розділу. При цьому актуальними завданнями є можливість варіювання різноманітним кристалічним форм розчинення, які відрізняє монокристал, як резерву і основи для оптоелектронних структур, в яких органічно, воедино пов'язані геометрична форма і фізичні властивості.

Спільність фізичних і технологічних проблем, розуміння явищ, що сприяють виникненню опуклих ( "спонтанних") мікрорельєфів з високою щільністю, однорідністю і відтворюваністю визначало мету роботи, якою було:

- дослідження взаємодії монокристала напівпровідника із середовищем, що призводить до препарування його мікрогеометрії і кристалізації на мікрогеометрії,

- дослідження взаємодії препаратів мікрогеометрії з випромінюванням, який розкриває його характер, для прогнозування та реалізації потенційних можливостей таких мікрорельєфів.

Для цього потрібно було :

- 1) Проаналізувати причини і механізм розвитку мікрогеометрій.
- 2) Дослідити морфологічні особливості мікрорельєфних поверхонь напівпровідників.
- 3) Дослідити оптичні спектри напівпровідників з мікрорельєфними поверхнями.
- 4) Якісно оцінити роль поверхневих станів в оптичних і фотоелектричних характеристиках напівпровідників з мікрорельєфною морфологією поверхні.

## 1. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ НАПІВПРОВІДНИКІВ

### 1.1 Передумови формування мікрорельєфу

У сучасній напівпровідниковій електроніці і оптоелектроніці ясно видно дві тенденції. Перша - прагнення до інформативності, тобто збільшення рівня інтеграції і відповідно мікромініатюризації компонентів для реалізації більшого числа схемних функцій на даній площі. По-друге, підвищення вимоги до електричних принципів роботи даного продукту як окремих компонентів, так і системи в цілому, їх стабільності, надійності, відсотку виходу придатних виробів. Паралельно цим тенденціям, а може бути, і завдяки їм, розвиваються фундаментальні дослідження, оскільки розміри компонентів стають порівнянні з областями просторового заряду, довжиною вільного пробігу носіїв і іншими характеристичними довжинами в напівпровідниках. За допомогою новітніх технологій вдається відкривати принципово нові, раніше не відомі закономірності, що діють як в складних системах, так і в окремих їх компонентах.

Впродовж останнього десятиріччя для вирішення багатьох завдань плідно застосовується технологія хімічної анізотропної обробки, що створює на поверхні напівпровідника контрольований мікрорельєф, що відображає топологічні особливості ІС або дискретного приладу (ДП). При цьому слідує відмова від традиційної підкладки орієнтації  $\{111\}$  і використання орієнтації підкладок по нізкоіндексним площинам  $\{100\}$  і  $\{110\}$ .

Морфологія мікрорельєфу (ограничений, габітус, внутрішня будова) при АТ відрізняється великим різноманіттям кристалічних форм розчинення, що є очевидним наслідком впливу більшого числа факторів кристалічну фазу, що розчиняється. Вона перш за все залежить від типу кристалічної решітки (структурного типу), який визначається сукупністю елементів симетрії і сил зв'язку між структурними

одинацями - атомами, молекулами, дефектами решітки. Крім того, на формування морфології мікрорельєфу впливають умови, при яких він виникає - середовище, її хімічний склад, часові і температурні режими. Виникнення мікрорельєфу може відбуватися або в пригноблених, або в вільних умовах. У першому випадку одні форми мікрорельєфу свідомо не розкриваються, процес взаємодії з середовищем протікає локально, на заданому топологією ділянці поверхні монокристала з переважним розвитком по одному або декільком кристалографічних напрямках. Такий мікрорельєф відносять до розряду наведено-профільованих. Він є штучно створеним, до деякої міри, мікрорельєфом, так як його створення зумовлено експериментатором, але з урахуванням внутрішньої будови монокристала. Другий тип мікрорельєфу - "спонтанний" - виникає в вільних умовах, теж локально, але локальність забезпечується внутрішньою неоднорідністю.

Наведено-профільні мікрорельєфи - прості канавки і отвори на Si та  $A^{III}B^V$  напівпровідниках служать елементами нових різноманітних і унікальних рішень. Зокрема, добре відомі ІС з діелектричною ізоляцією компонентів: V-АТЕ технологія, VIP-процес, поліплапарна технологія, V-МОП або U-МОП транзисторні структури, меза-структури діодів, фотодіодів, лазерів, швидкодіючі потужні тиристори з вертикальним каналом, багатоперехідні сонячні елементи з ККД перетворення сонячного випромінювання понад 20%, матриці фоточутливих польових емітерів. Деякі технологічні та конструктивні рішення із застосуванням наведено-профільованих мікрорельєфів ілюструють рис.1.1-3.

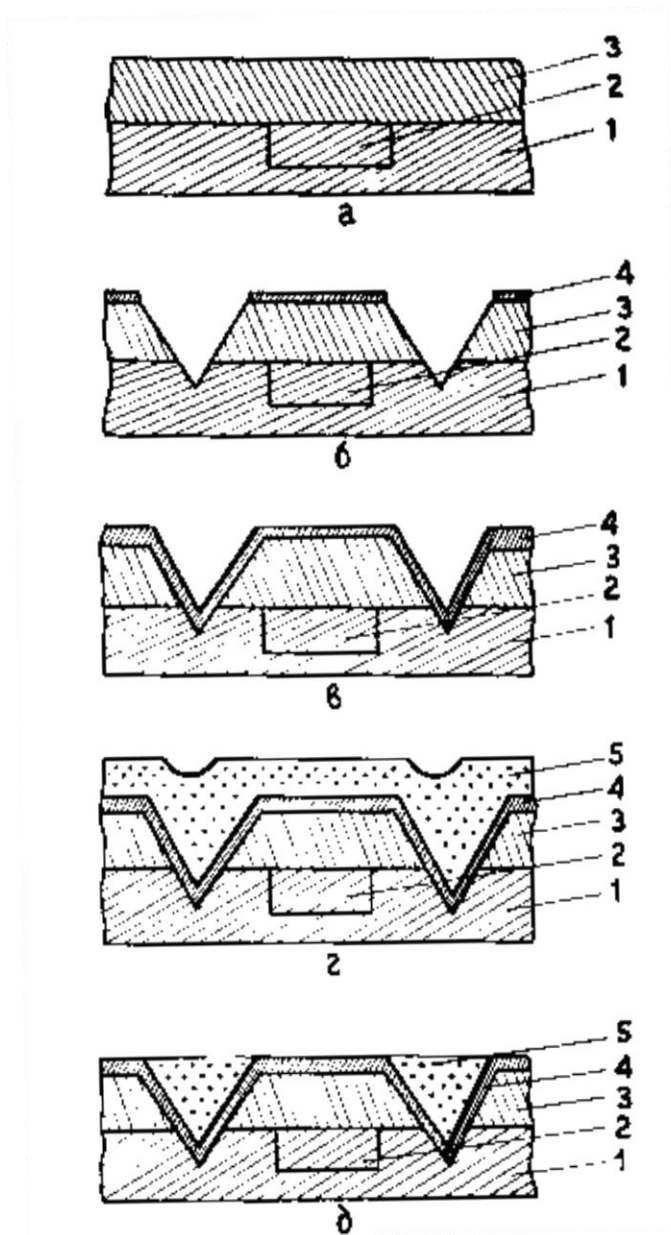


Рисунок 1.1 – Спрощена схема основних етапів ізоляції компонентів ІС при поліпланарній технології: а - утворення на  $p$ -підкладці прихованого  $p^+$  -шар і  $p$ -епішару, б - маскування і травлення ізолюючих заглиблень, в - вирощування ізолюючого оксиду, г – осадження полікремнію, д - видалення зайвого полікремнію, 1 - підкладка, 2 - прихований шар, 3 - епішар, 4 - шар оксиду, 5 – полікремній



Рисунок 1.2 – Конструкції лавинних фотодіодів: 1 - підкладка, 2 - дифузний шар, 3 - контакти, 4 - шар оксиду

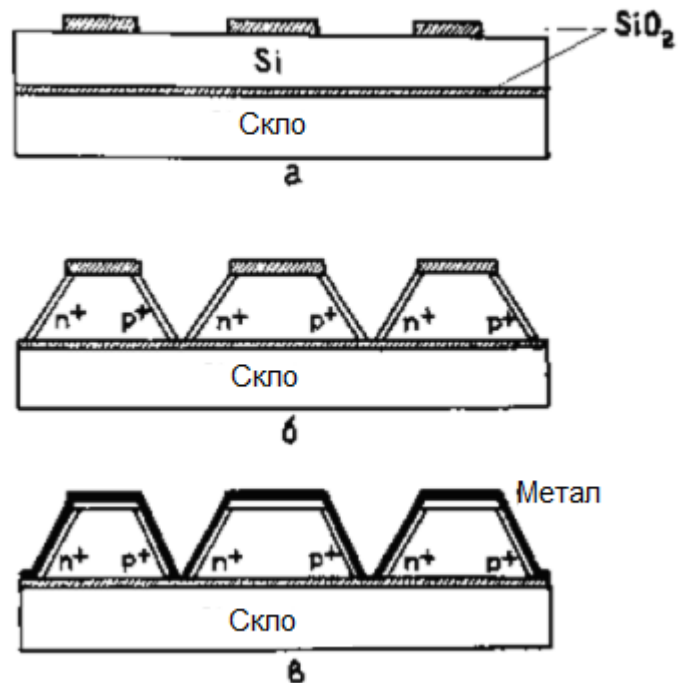


Рисунок 1.3 – Основні технологічні етапи виготовлення багато-перехідних сонячних елементів з V-образними канавками: а - вирощування  $\text{SiO}_2$ , анодне окислення для його з'єднання зі склом, витравлювання вікон в  $\text{SiO}_2$ , б - АТ, іонне легування для створення  $n + i p +$  областей, в - металізація

Останні науково-технічні публікації демонструють можливості використання направлено-профільованих мікрорельєфів, в основному на Si і GaAs, як високо надійних механічних структур на додаток до їх традиційної ролі як матеріалу електронної техніки. Мікромініатюрні механічні пристрої і компоненти - кремнієві мембрани (маски для рентгенівської та електронної літографій, датчики тиску, акселерометри, торсійні дзеркала), консольні балки (фільтри, решітки модуляторів, перемикачі), друковані головки на Si і GaAs також використовують структурно-геометричні особливості монокристала. При цьому спільність геометрій мікрорельєфу як електронних, так і механічних особливо необхідна і зручна, коли потрібна інтеграція або суміщення і зчленування мікромеханічних пристроїв і компонентів з електронними пристроями і компонентами, скажімо мікропроцесорами.

Можливості другого типу мікрорельєфів - "спонтанних" за винятком сонячної енергетики, де Si мікрорельєфи вже знайшли застосування не реалізовані особливо на  $A^{III}B^V$  напівпровідниках ні технологічно, ні в приладобудівному виконанні. Тому поглиблення розуміння їх природи, технологічна реалізація для домінуючих в оптоелектроніці напівпровідників, встановлення загальних принципів розчинення напівпровідників, що призводять до утворення таких мікрорельєфів, отримання на них структур фотоприймачів, дослідження фізичних явищ, які супроводжують неплоскі кордони розділу – енергетичного спектра, оптичних і фотоелектричних властивостей, розсіювання носіїв, дослідження морфології, хімічного складу "спонтанного" мікрорельєфу уявлялося пріоритетним напрямком і актуальним завданням,

При розгляді росту і розчинення кристалічної фази насамперед виникає питання про зовнішній формі, тобто, про огранення і габітус. Зазвичай проблема габітусу кристалу розглядається на основі подання Гіббса про форму, яка має мінімальну поверхневою енергією. Але припущення про те, що розчинення і зростання

визначаються умовами, що впливають з принципу Гіббса, в основному не відповідає дійсності. Форма з мінімальною поверхневою енергією виникає тільки в ідеальному випадку - при рівновазі між кристалом і середовищем, називається рівноважною, "виводиться" з кристалічної структури, і краще за все відображає внутрішню будову монокристалу. Вивчення цих форм і їх зв'язку з формами розчинення і зростання сприяє успішному тлумаченню закономірностей впливу факторів зовнішнього середовища і внутрішніх неоднорідностей для отримання реальних стійких, відтворюваних морфології мікрорельєфу.

Доцільно навести деякі загальні відомості щодо структури розглянутих напівпровідників. Si, Ge, і  $A^{III}B^V$ - напівпровідники є монокристалами кубічної сингонії, Si і Ge мають кристалічну решітку типу алмаза, що відноситься до голоедричного типу  $m\bar{3}m$ ;  $A^{III}B^V$  напівпровідники - структуру сфалеритової гелієдриту  $\bar{4}3m$ . Спільним є те, що структури (рис. 1.4) складаються з тетраедричних угруповань, де кожен атом оточений 4-ма еквідістатно розташованими сусідами. Гратка алмазу і сфалериту утворені з 2-х вставлених одна в іншу гранецентрованих кубічних грат, взаємно зміщених уздовж просторової діагоналі на одну чверть її довжини. У алмазоподібній решітці Si або Ge всі атоми хімічно ідентичні, в решітці  $A^{III}B^V$  напівпровідників - одна підгратка складається з атомів III групи, інша - з атомів V групи. Тобто на противагу Si і Ge, де кожен атом оточений 4-ма тотожними атомами, в решітці  $A^{III}B^V$  напівпровідників вузли її поперемінно зайняті атомами III і V груп так, що кожен атом III групи оточений еквідистантно 4-ма атомами V групи, а атоми у групі мають в якості найближчих сусідів 4 атома III групи. У алмазоподібної решітки більше багатство наборів симетрично еквівалентних площин і напрямків: всі грані куба  $\{100\}$  и октаедра  $\{111\}$  і ромбододекаедра  $\{110\}$  еквівалентні, як і напрямки, перпендикулярні цим площинам  $\langle 100 \rangle, \langle 111 \rangle, \langle 110 \rangle$ . На відміну від алмаза у сфалериту немає центру симетрії, деякі площини складаються або з атомів III, або V груп. Такими площинами є площини  $\{111\}$ . Структура сфалериту і частково іонний



характер зв'язку між атомами обумовлюють кристалографічну полярність цих матеріалів вздовж напрямку  $\langle 111 \rangle$ .

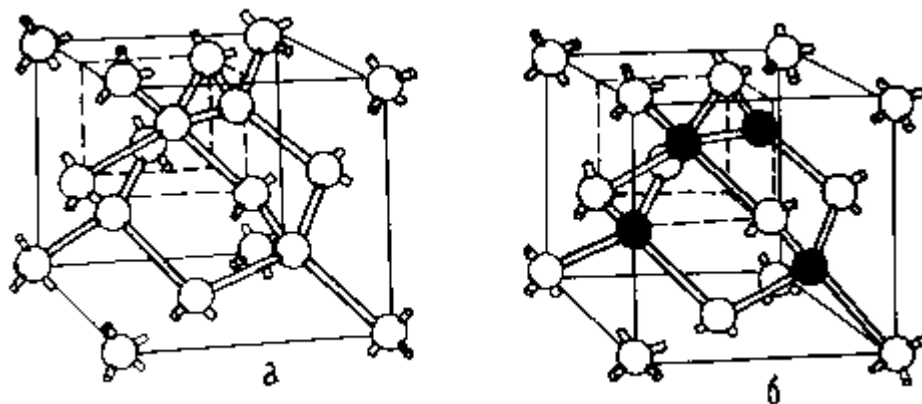


Рисунок 1.4 – Кристалічна структура напівпровідників: а - IV групи - тип алмаза, б -  $A^{III}B^V$  напівпровідників тип сфалериту

Атомна структура поверхні, тобто її орієнтація визначає щільність поверхневих зв'язків і характер зв'язку поверхневих атомів між собою і з атомами обсягу. У Si і Ge в площині  $\{100\}$  кожен поверхневий атом пов'язаний з двома атомами в обсязі і має два розірвані зв'язки на поверхні. У площинах  $\{110\}$  і  $\{111\}$  на поверхні є тільки один розірваний зв'язок. У площині  $\{110\}$  кожен поверхневий атом пов'язаний з двома сусідніми поверхневими атомами і з одним атомом в обсязі. А в площині  $\{111\}$  кожен поверхневий атом пов'язаний з трьома атомами в обсязі. Тому слід очікувати меншої хімічної активності площини  $\{111\}$ . Чи є більш хімічно активною площина  $\{100\}$  або  $\{110\}$  залежить, очевидно, від конкретного хімічного середовища, від співвідношення енергії розірваного зв'язку на поверхні  $\{100\}$  плюс енергія розриву з об'ємом і енергії розірваної зв'язку на поверхні  $\{110\}$  плюс енергія розриву з об'ємом (рис.1.5а).

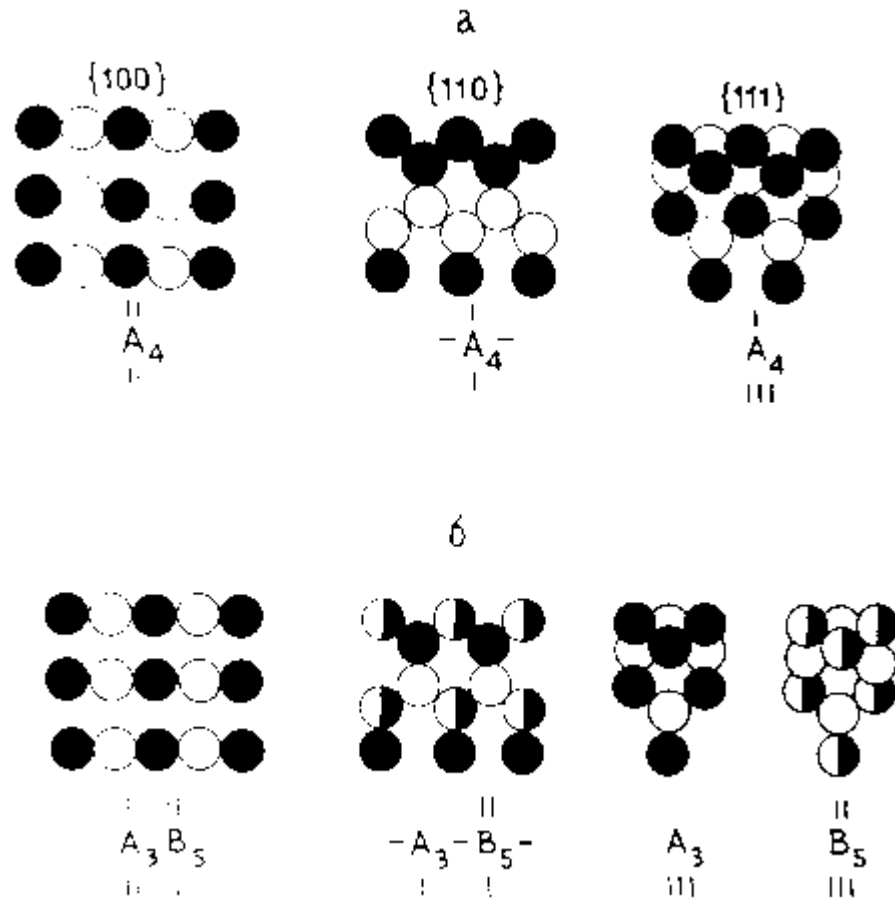


Рисунок 1.5 – Положення атомів на поверхні граней: а – напівпровідників IV групи, б -  $A^{III}B^V$  напівпровідників

У  $A^{III}B^V$  напівпровідників необхідно враховувати різний хімічний склад атомів. Атомно пласка поверхня  $\{100\}$   $A^{III}B^V$  напівпровідників містить або атоми III групи, або V групи. Реальна поверхня  $\{100\}$  східчаста, тому поверхневі атоми можуть бути одночасно атомами III і V груп. Як і в разі напівпровідників IV групи, і ті і інші пов'язані з двома атомами обсягу, але поверхневий атом III групи має один розірваний зв'язок, є той час як поверхневий атом V групи - 3-и розірвані зв'язки, що забезпечує велику хімічну активність, тобто поверхні  $\{100\}$   $A^{III}B^V$  напівпровідників можна вважати до певної міри поверхнями атомів V групи. На поверхні  $\{110\}$  поверхневий шар також складається з атомів III і V груп. Кожен з цих атомів пов'язаний з одним

атомом в обсязі і з 2-ма атомами на поверхні. В результаті атоми V групи мають 2 розірвані зв'язки, а III групи не мають їх. І в цьому випадку з точки зору хімічної активності поверхню  $\{110\}$  можна вважати поверхнею атомів V групи. Яка ж з цих двох поверхонь буде більш хімічно активної  $\{100\}$  або  $\{110\}$  також залежить від хімізму середовища. Поверхня  $\{111\}$  складається або з атомів III групи-А  $\{111\}$ , або з атомів V групи - В  $\{111\}$ . Поверхневі атоми і на А  $\{111\}$  і на В  $\{111\}$  пов'язані з 3-ма атомами в обсязі, але на А  $\{111\}$  вільних зв'язків немає, а на В  $\{111\}$  - два вільні зв'язку. Безсумнівним з цієї схеми (рис.1.5б) є те, що з усіх 3-х поверхонь  $A^{III}B^V$  напівпровідників найменш хімічно активної є поверхню А  $\{111\}$ , а найбільш хімічно активної  $\{100\}$ .

Хімічна активність кристалографічних площин має і друге джерело у вигляді різної "заселеності" –ретикулярну щільність атомів. Це можна пояснити рис. 1.6, на якому умовно зображена схема розташування атомів в кристалі. Площина малюнка збігається з однією з площин  $\{100\}$ , що проходить через вузли кристалічної решітки. Якщо виконати перетин такого кристала площинами, перпендикулярними площині креслення, то в залежності від орієнтації січної площини щільність "заселення" їх атомами різна, різна і відстань між суміжними січними площинами. Не важко помітити загальну характерну особливість: чим простіше символ площині (значення індексів Міллера менше), тим більше ретикулярна щільність і тим менше відстань між паралельними площинами. Саме щільності з більшою ретикулярної щільністю і з великими міжплощинні відстані найчастіше проявляються на реальних мікрорельєфах.

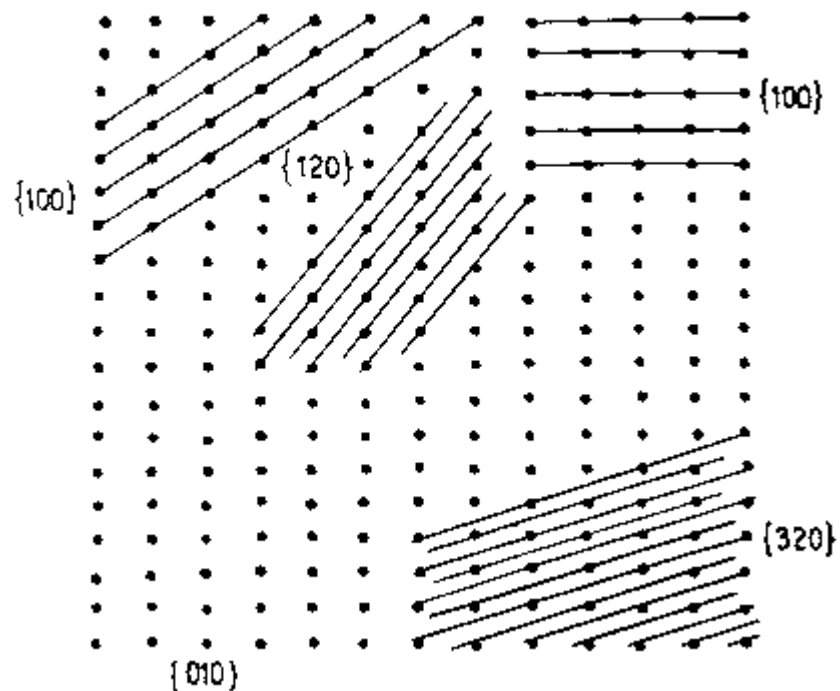


Рисунок 1.6 – Площини з різними індексами Міллера в кубічній решітці  
(паралельно осі Z)

У структурі алмазу дуже ретельної упаковки немає, але є площини (шари), упаковані щільніше, ніж інші площини - це шари площини  $\{111\}$ . Ретикулярна площину в таких шарах найбільша, а напрямки  $\langle 110 \rangle$  (діагоналі граней куба), що лежать в цих шарах, є найбільш щільно упакованими напрямками. Якщо прийняти ретикулярну щільність площини  $\{100\}$  за одиницю, то ставлення між густиною упаковки 3-х головних кристалографічних площин дорівнює  $\{100\} : \{110\} : \{111\} = 1 : 1,414 : 2,308$ , тобто в решітці алмазу площина  $\{111\}$  має найбільшу ретикулярну щільність, що грає велику роль при анізотропії розчинення.

У структурі сфалериту найбільш щільноупакована площина -  $\{111\}$ . Кожен атом V групи в цій площині оточений 6 такими ж атомами. Атоми сусідніх шарів знаходяться в порожнинах між атомами вихідного шару, тобто число найближчих

сусідів 12, що служить характерною ознакою дуже ретельної упаковки. Атоми III групи оточені 4-ма атомами, тобто розташовані в тетраедричних пустотах.

Площини "найповніших" упаковок характеризуються мінімальною поверхневою енергією. У стані рівноваги між кристалом і зростаючої або розчинюючим середовищем кристал прагне прийняти ту форму, яка при даному обсязі згідно принципу Кюрі-Гіббса-Вульфа характеризується мінімумом поверхневої енергії. Тобто площині з найменшою поверхневою енергією або з найбільшою ретикулярної щільністю служать тими гранями, які визначають огранений і габітус мікрорельєфу. У кубічної сингонії - це межі октаедра  $\{111\}$ .

*Основні положення внутрішньої морфології кристалів.*

Одне з основних положень внутрішньої морфології кристалів може бути сформульовано таким чином: "Реальний кристал складений пірамідами зростання його граней" - закон Бекке про секторіальну будову кристала - тобто зростання кристала здійснюється послідовними відкладеннями речовини на його гранях. Тому в реальних кристалах поряд з послідовними шарами-зонами можна розрізнити і області-сектора, що утворилися відкладенням речовини на кожній з його граней і мають форму пірамід, підставою якої служать відповідні межі, а вершини лежать в початковій точці кристала. Так як реальні кристали в тій чи іншій мірі неоднорідні, то межі між пірамідами зростання можуть бути місцем, де виникає внутрішнє напруження через недосконалість стику решітки на границі пірамід.

Дефекти решітки і домішки, що концентруються поблизу ребер пірамід призводять до ослаблення зв'язку між ними. Ці внутрішні неоднорідності повинні проявитися у зовнішній морфології мікрорельєфу при хімічному руйнуванні кристала, перш за все, через зміну габітусу рельєфу, тобто піраміди на сусідніх ділянках і в шарах можуть відрізнитися своїми розмірами. Така будова кристала з об'ємних секторів (пірамід росту) добре пояснює виникнення пірамідального мікрорельєфу при

розчиненні монокристалу, який органічно притаманний даному матеріалу і відображає його внутрішню морфологію.

Піраміди росту відповідають незмінним і плавно мінливим умовам кристалізації. Якщо умови кристалізації змінні то спостерігаються складні форми пірамід наростання, поява нових граней, перетворення в призму, особливі форми пірамід наростання типу "скелетних" і "мальтійського хреста".

Оскільки при зростанні будь-якого монокристала останній може розглядатися як складений з послідовних шарів і секторів, то, очевидно, метод розшифровки по ним історії кристала, може носити універсальний характер.

Зонарна будова кристала відображає зміну в часі зовнішніх умов зростання всього монокристала. Секторіальна будова показує індивідуальний стан кожного з елементів і їх взаємовідносини із середовищем, з якої вони виростають. У секторіальній будові монокристала проявляється його векторна природа, тобто якщо здійснити розчинення монокристалів в анізотропному середовищі, то можна отримувати різні морфологічні типи мікрорельєфу, морфологічне дослідження яких дозволить окреслити як картину росту кристалу, так і оцінити їх придатність для фізичних досліджень.

З геометро-кінематичної точки зору на розчинення кристала існує 3 критерії стабільного утворення вгнутих (ям) і опуклих (пагорбів) мікрорельєфів. По-перше, це співвідношення швидкості переміщення огранюваних граней зі швидкістю переміщення всієї поверхні. По-друге, ця умова взаємності між швидкістю розчинення і кривизною поверхні. По-третє, це співвідношення між швидкістю переміщення точки максимальної кривизни фігури травлення і швидкістю переміщення вихідної поверхні.

Коли локальне травлення площині (2) йде швидше, ніж травлення всій поверхні (2), тобто нормальна швидкість розчинення вище тангенціальної, завжди утворюється

яма травлення; якщо ж локальне травлення йде повільніше, ніж травлення всій поверхні, то утворюється бугоркова поверхня (рис. 1.7).

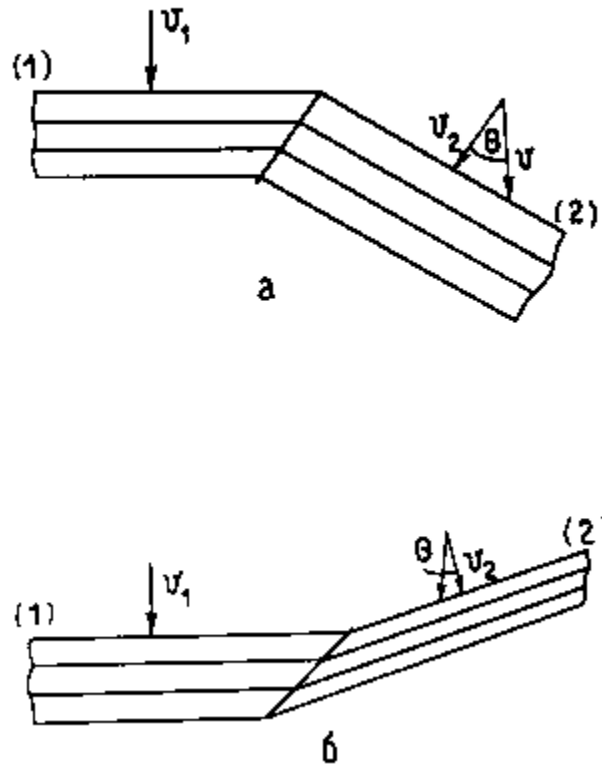


Рисунок 1.7 – Перший критерій стабільності для формування : а – ями травлення, б – бугор травлення

Для стабільності ямки травлення справедливо  $v_1 < \frac{v_2}{\cos \theta}$ , де  $v_1$  і  $v_2$  - швидкості травлення нормальні до вихідної поверхні і межі ямки травлення відповідно, а  $\theta$  - кут між нормальми до обох граней. На рис. 1.7 ці дві площини представлені після послідовно фіксованих часів травлення. Для стабільності горбка критерій стабільності записується у вигляді  $v_1 > \frac{v_2}{\cos \theta}$ . Другим критерієм стабільності утворення ямок травлення є вимога, щоб через опуклого вигину в околиці лінії перетину між площинами (1) і (2) не існувало межі, швидкість травлення якої була б вище, ніж

площині (2). При утворенні горбка через викривлення в околиці лінії перетину площин (1) і (2) не може існувати межа іншої орієнтації, що має більш повільну швидкість, ніж  $v_2$ , такі орієнтації заважали б трітійся площині (2) з максимальною швидкістю в разі ямки травлення, і з мінімальною - в разі горбка, і бути огранованою площиною. Іншими словами, друга умова стабільності означає, що опуклі поверхні при розчиненні огрануються швидкотравними площинами, тоді як повільно травні площині стають гранями на увігнутих поверхнях. І, нарешті, третій критерій стабільності вимагає, щоб напрямок траєкторії вершини пагорба був паралельно напрямку швидкості мінімального переміщення, для ямок травлення - напрямком траєкторії точки перетину всіх граней всередині ями був напрямком максимальної швидкості переміщення. Отже, підбиваючи підсумок, для утворення ямок травлення необхідно, щоб:

1.  $v_1 < \frac{v_2}{\cos \theta}$
2.  $v_2 < v$  для всіх орієнтацій сусідніх с площиною (2), якщо поверхність впукла, і  $v_2 > v$  сусідніх з площиною (2), якщо поверхність випукла.
3. Напрямок траєкторії вершини паралельна  $v_{\min}$

Проблема відшукування ефективного анізотропного травника може бути вирішена шляхом підбору необхідного співвідношення нормальної і тангенціальної складової швидкості розчинення. Зменшення відношення тангенціальної і нормальної швидкостей принципово може відбуватися 3-ма способами:

1. Зменшення тангенціальної складової швидкості інгібіторною дією отрути розчинення, який сприяє зменшенню питомої вільної поверхневої енергії і, адсорбуючись на ступенях, блокує їх тангенціальне поширення. Інгібітори повинні мати розмір атома, який можна порівняти з розміром атомів розчинника.



2. Збільшенням нормальної складової швидкості розчинення при енергетичної неоднорідності, наприклад, при вивільненні енергії ядра дислокації або наявності домішок в решітці.

3. Зміною відношення швидкостей при зміні температури і використанні різних температурних залежностей їх енергій активації.

## 1.2 Дослідження виникнення мікрорельєфу в Si

Анізотропним травником для Si є гідроксид калію , оптимальною концентрацією з точки зору анізотропії 10% водний розчин *KOH*. Тому дослідження виникнення "спонтанного" мікрорельєфу було проведено для цієї концентрації травника.

Як показало дослідження, мікрорельєф на  $\{100\}$  представляє поліедри травлення у вигляді правильних тетрагональних пірамід з бічними гранями  $\{111\}$ , які є природними (габітусними) поверхнями монокристалла (рис.1.8).



Рисунок 1.8 – Анізотропно травлена поверхня Si {100}

Була досліджена динаміка формування мікрорельєфу при варіації режиму анізотропної обробки - температури в інтервалі 60 ... 100 ° С і тривалості травлення від 3-х до 9-и хвилин. Звертає на себе увагу те, що виникнення мікрорельєфу на Si {100} в досліджуваному інтервалі температур відбувається практично миттєво за 20 ... 30с. На цьому часовому етапі ми маємо при низьких температурах порівняно однорідну за розмірами картину мікрорельєфу.

З підвищенням температури просторова однорідність мікрорельєфу порушується. Поряд з пірамідами малих розмірів з'являються 1-2 мікронні утворення. Збільшення температури процесу розчинення, а також часу травлення при незмінній температурі призводить до того, що частина пірамід в процесі травлення зникає, а "виживають" тільки ті піраміди, які мають правильну орієнтацію стороною по  $\langle 110 \rangle$ , а також, коли нормальна складова швидкості розчинення більше тангенціальної.

З розгляду послідовних стадій розчинення видно, що збільшення часу травлення при постійній температурі (наприклад,  $70^{\circ}\text{C}$ ) також сприяє укрупненню мікрорельєфу. Тобто тут, мабуть, можна припустити дію "еволюційної селекції", яка грає ту ж роль, що і при зростанні кристала. За час, достатній для повного заповнення поверхні мікрорельєфом (9-12 хв.) При фіксованій температурі в інтервалі  $60-90^{\circ}\text{C}$ , розмір пірамід змінювався від 3-х до 13-14 мкм. Аналогічне управління розмірами пірамід відбувається, як зазначалося вище, і при зміні температури. Але, отримуючи більші розміри пірамід при підвищеннях температури, ми маємо досить значний невеликий "фон". Тому збільшення тривалості травлення є способом зменшення коливання розміру пірамід, а, отже, отримання більш однорідного мікрорельєфу. Докладні дані режимів освіти мікрорельєфу представлені в таблиці 1.1 .

Таблиця 1.1 – залежність розміру пірамід травлення від режиму обробки

Розмір пірамід травлення , мкм			
Час травлення, хв Температура, $^{\circ}\text{C}$	3	6	9
60	1,5	1,5	3
65	1,5	3	5,1
70	1,5	3,3	5,8
75	3,3	6,6	8,8
80	3,9	7,4	9,5
85	5,9	10,4	13,1
90	6,7	11,5	14
95	8,7	-	-
100	11,6	-	-

З таблиці випливає, що розмір піраміди травлення, скажімо, 6 мкм. можна отримати двоюким шляхом: при температурі 70 ° С і тривалості травлення 9 хв. і при 85 ° С за 3 хвилини. Перший режим є кращим, тому що формує мікрорельєф одноріднішого габітусу і забезпечує практично повне заповнення їм поверхні. Температури 95 і 100 °С для отримання мікрорельєфу не придатні, тому що змінюється характер протікає реакції і травник з анізотропного стає поліруючим.

Дослідження режимів обробки, наведених в таблиці 1.1, дані для КЕФ-1 {100}, і це необхідно враховувати при використуванні його, так як питомий опір матеріалу, тип легуючої домішки, спосіб вирощування монокристалу, позначається на однорідності внутрішньої будови отже, проявляється в морфологічних особливостях мікрорельєфу.

Детальне дослідження фрагментів мікрорельєфної поверхні *Si* показує, що не у всіх пірмід має місце повний однаковий розвиток всіх граней.

Морфологія поверхні кристалічної грані піраміди показує (рис.1.8), що вона не є площиною в мікромасштабі, а має рельєф зі східчасто-шаруватою будовою, досить складною і тонкою, походження якої пояснює як молекулярно-кінетична теорія росту кристалу, так і його розчинення.

Вивчення акцесорного рельєфу граней показує, що шари починаються біля основи піраміди і рухаються по межі трикутними утвореннями. Шари спускаються в напрямку вершини піраміди, аналогічним чином падає пересичення розплаву-розчину, тобто в піраміді існує градієнт домішки від основи до її вершині. Звертає на себе увагу наявність декількох систем шарів-ступенів. Великі шари шириною 1 ... 3 мкм, складаються з середніх і дрібних шириною 0,1 ... 0,01 мкм. Лінії шарів росту при загальному трикутному мотиві утворюють на межі досить складні штрихування. Ділянками вони бувають прямолінійними, криволінійними або зубчастими. Тоді торець ступені являє Кліфф-поверхність. Криволінійні шари відображають миттєву зміна перенасичення на поверхні. "Ескалатор" ступенів виникає, якщо новий шар

з'явився передчасно, коли старий шар ще не завершився. Така ділянка спостерігається на лівій грані ближче до основи піраміди. Зубчаста будова сприяє захопленню розплаву (розчину), при цьому між зубцями виходить збіднений шар. Отже, обриси шарів, їх особливості розповсюдження по межі відображають перш за все домішкові флуктуації. Поверхня дрібних ступенів містить бугороподібні частини або різко виражені смуги, або одиничного плану площі до  $0,1 \text{ мкм}^2$ .

Таким чином, з дослідження АТ поверхні і морфології межі  $\{111\}$ , їх порівняння з загальними закономірностями і особливостями зв'язку морфологічних особливостей про умови утворення монокристала, а також на основі наявних в літературі окремих критеріїв і ознак, можна зробити висновок, що грань  $\{111\}$  чітко реагує на умови росту даного монокристалу, може бути чітким генетичним визначником монокристала, а також констатувати, що не існує двох однакових мікроморфологій.

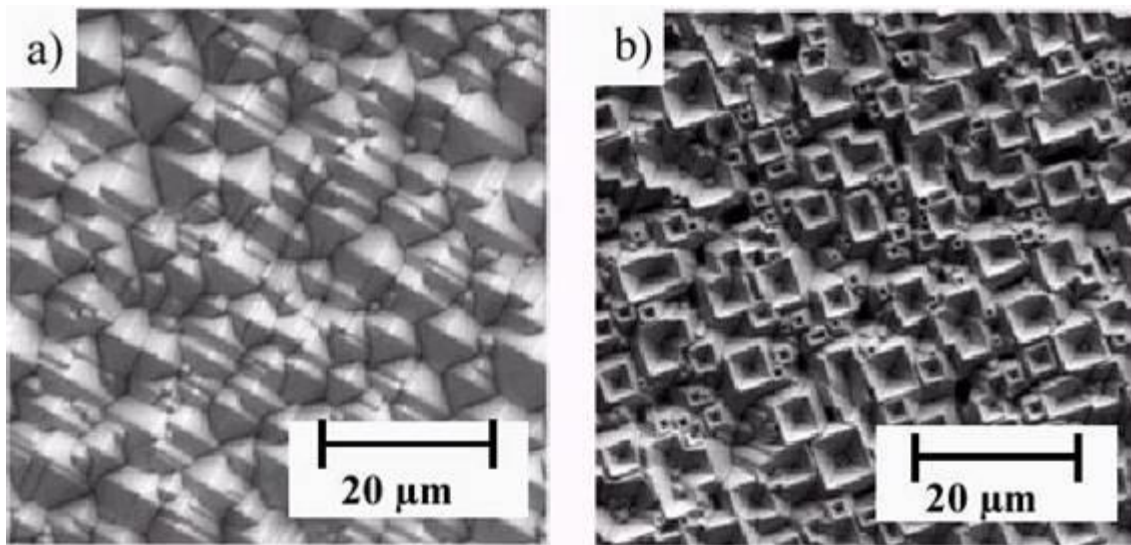


Рисунок 1.9 – Формування мікрорельєфу на Si  $\{100\}$

### 1.3 Дослідження виникнення мікрорельєфу в Ge

Випробування ряду відомих травників для Ge не приводило до утворення мікрорельєфу, що визначався кристалографією решітки. Наприклад, обробка в  $H_2O_2$  давала мікроструктуру поверхні в формі зрізаних тетрагональних пірамід з досить великими плоскими основами, але в цілому не змінювала площинності поверхні. Тому питання стояло про розробку анізотропного травника для Ge, визначення його оптимальної концентрації.

Щоб збільшити хімічну активність травника, зробити його не тільки кристалографічно виборчим, а й структурно-чутливим в  $H_2O_2$  був добавлений окислювач  $H_2SO_4$ , що не виключає утворення кислоти  $H_2S_2O_8$ , що має сильні окислюючі здатності.

Для визначення оптимальної концентрації складу формування мікрорельєфу проводилося при температурі кипіння. Були випробувані 4 композиції складу, дані про яких представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.2 – Формування мікрорельєфу на Ge {100} в залежності від складу травника

Склад травника	Співвідношення компонент	Формування мікрорельєфу
$H_2SO_4 : H_2O_2$	1:8	Мікрорельєф не формується
$H_2SO_4 : H_2O_2$	2:8	Мікрорельєф формується повільно
$H_2SO_4 : H_2O_2$	3:8	Мікрорельєф формується добре

Продовження таблиці 1.2

$H_2SO_4 : H_2O_2$	4:8	Мікрорельєф не формується
--------------------	-----	---------------------------

Видно, що формування пірамідального мікрорельєфу не відбувається ні в першій, ні в четвертій композиціях.

Розглянемо морфологію мікрорельєфу, що утворюється в оптимальному травнику при температурі кипіння. Як фактор зміни виберемо тривалість обробки. РЕМ-мікрофотографія (рис.1.10) показує, що основна форма розчинення монокристалу Ge-багатогранна, аналогічна Si, але з різновидами у вигляді конуса (тетрагональних пірамід зі шилувидною вершиною. Також, як в Si, існує переважна орієнтація фігур травлення по  $\langle 110 \rangle$ . На поверхні бічних граней, які також, як і у Si не є площиною, особливо, в області вершини різко виражене ступінчате штрихування, причому від Si її відрізняє те, що вона розташована паралельно основі, і шари рухаються від вершини до основи. Списоподібний характер піраміди може свідчити про переривчасте зростання монокристала і про падіння пересичення до основи піраміди, тобто про градієнт домішки, протилежному.



Рисунок 1.10 – Анізотропно травлена поверхність Ge {100}

#### 1.4 Дослідження виникнення мікрорельєфу в GaAs

Для отримання мікрорельєфу на поверхні GaAs {100} були використані  $\text{HNO}_3$  і її водні розчини. Морфологічні особливості мікрорельєфу, описувані нижче, отримані на {100} поверхні GaAs: Cr. Але аналогічні мікрорельєфи спостерігалися на напівізолюючому не легovanому GaAs, і - GaAs (Te, Sn), а також на поверхні {111}, причому в останньому випадку мікрорельєф був одностороннім. На рис.1.11 показані морфологічні перетворення мікрорельєфу в травнику.



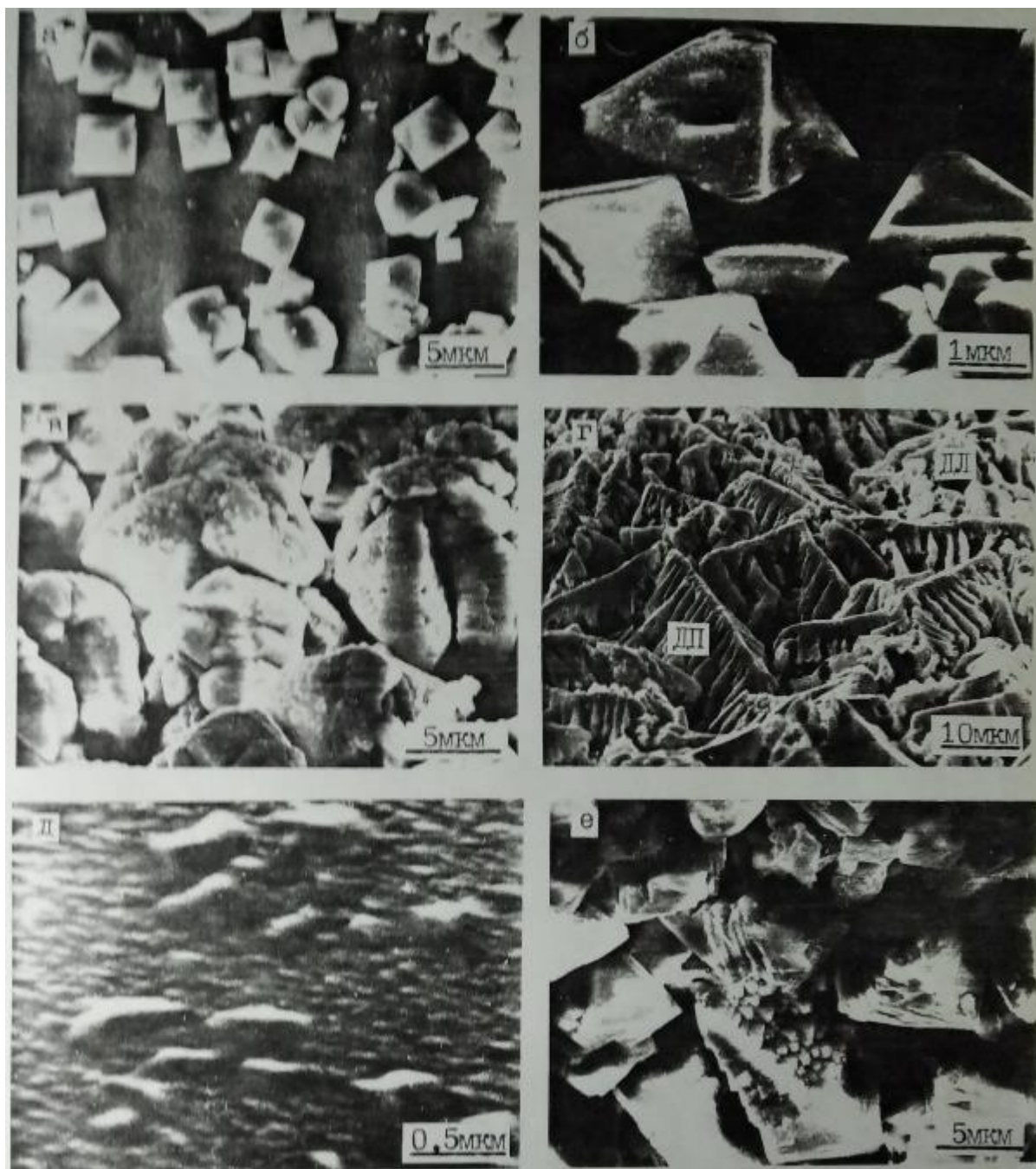


Рисунок 1.11 – Утворення мікрорельєфу на GaAs {100}

Розглянемо детально еволюцію мікрорельєфу при першому режимі травлення.

На початкових стадіях формування (час травлення 10с) мікрорельєф є поліедрами травлення з переважанням октаедрами - стаціонарної форми розчинення для монокристалів кубічної сингонії, як в Si і Ge. Бічні грані октаедра є природними

поверхнями монокристалла  $\{111\}$  В. Нахил осей 100 октаедрів до поверхні  $\{100\}$  змінюється в широких межах. Поряд з відносно правильними октаедрами спостерігаються інші форми розчинення, де в огранені присутні грані куба  $\{100\}$  і ромбічного додекаедра  $\{110\}$ . Сторона основи не має переважної орієнтації, як в Si і Ge, а розорієнтованість від  $\langle 110 \rangle$  до  $\langle 100 \rangle$ . Як в Si і Ge на поверхні бічних граней  $\{111\}$  присутні макро- і мікроступні, на ступенях висока концентрація зламів, тобто та ж торцева кліф-поверхність. Не проявляє гладкості дуже часто і поверхня ступеней.

У міру травлення (20-60с) мікрорельєф проходить ряд проміжних нестійких морфологічних форм типу скелетних, початкова стадія яких характеризується воронкоподібним провалом на межі, а більш пізні - чотирипромінною структурою типу "мальтійський хрест" з чіткими тетрагонами пірамідами на хрестовинах. Серед цієї стадії спостерігається величезна кількість багатоповерхових пірамідально-призматичних утворень. При подальшому збільшенні тривалості обробки (60-90с) домінуючою стає дендритна морфологія. Дендритна будова виникає як з скелетних форм, так і з призматично-пірамідальних утворень. На рис.1.11 видно чітко сформований каркас дендрита, що виник з пластинчастого утворення. Дендритна будова, що виникла з піраміди, має в первинній гілці ребра піраміди, від якого відходять вторинні гілки і гілки більш високих порядків. Якщо первинні гілки не розпалися, вони виходять із загальної вершини, утворюючи дендритну чотирипромінну зірку. Головна гілка дендрита, як і слід було очікувати, не має переважної орієнтації - розорієнтованість в інтервалі  $0 \dots 90^\circ$ .

Таким чином, анізотропне травлення поверхні GaAs має велику кількість структурних форм. Зміна однієї морфології на другу – полієдральної на дендритну - здійснюється через ряд проміжних форм розчинення, до яких відносяться пластинчасті утворення і скелетні форми розчинення. Однак суворого кордону між цими морфологіями не існує, особливо між скелетною і дендритними морфологіями.

Ці форми розчинення, будучи результатом взаємодії структури кристала і середовища кристалізації, а згодом, і середовища розчинення, відображають технологічні умови росту монокристала - часові, теплові, концентраційні та інші режими - через кордон взаємодії монокристал - анізотропний розчинник. Через наявність двох підрешіток в  $A^{III}B^V$  напівпровідниках в деяких середовищах картина цієї межі є геометрично неоднозначною. Природно припускати, що хімічний склад цих морфологій і плоских ділянок повинен бути різним. Тому, як і для напівпровідників IV групи, досліджувався елементний склад мікрорельєфного шару.

Початковий вибір анізотропного травника і режимів АТ, як і в більшості робіт по хімічній обробці напівпровідників, на жаль, проводився в основному емпірично, хоча емпіризму передував аналітичний аналіз літературних даних. Спільне ж дослідження морфології анізотропно травленої поверхні її керованості і кінетики анізотропної реакції дозволяє висловити припущення про природу таких реакцій, визначити вибір травника, гідродинамічні умови проведення процесу АТ і інтенсифікувати цей процес.

Реакції АТ засновані на саморозчиненні напівпровідника, протікають на кордоні двох фаз (тверде тіло-рідина), тобто є гетерогенними. Гетерогенні процес, як правило, багатостадійний: доставка реагенту до поверхні напівпровідника, власна хімічна реакція на поверхні напівпровідника і відведення продуктів реакції від поверхні в глиб травника. Можуть спостерігатися і інші стадії, пов'язані з хімічними перетвореннями вихідної речовини в розчині (зміна складу речовини) або з додатковими хімічними перетвореннями продукту реакції у поверхні твердого тіла. Кржна з цих стадій може бути лімітуючою, тобто мати малу швидкість і надати найбільший опір процесу утворення мікрорельєфу.

Дискримінувати лімітуючі стадії процесу АТ будемо по енергії активації, досліджуючи температурну залежність швидкості хімічної реакції. Якщо швидкість

хімічної реакції оцінювати характерним розміром поліедра (висотою), віднесеної до одиниці часу, то реакція АТ є псевдо-молекулярною і протікає по першому порядку.

## 2. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МІКРОРЕЛЬЄФУ АНІЗОТРОПНО ТРАВЛЕНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКІВ

### 2.1 Оптична модель мікрорельєфу поверхні

Вивчення оптичних властивостей мікрорельєфних поверхонь має важливе значення як для фундаментальних досліджень, так і для практичних застосувань. Такі поверхні можуть привернути увагу фахівців в області теорії багатофазного розсіювання, оскільки структура і форма поверхні, яка відображає структуру решітки монокристала, є математично описуваною; теплофізиків, які вивчають вплив рельєфу на радіаційну здатність такими поверхнями. Великий інтерес в останнє десятиліття викликає використання їх в геліотехніці, фотоприймачах видимого та ближнього діапазону, є спроби використання в некогерентних випромінювачах, цілком можливо створення джерел світла міліметрового діапазону при перетворенні поверхневих плазмонів в фотони. Крім того, оптична спектроскопія мікрорельєфних поверхонь на додаток до електронно-зондовому аналізу дозволить отримати інформацію про сам процес АТ і робити оптичні властивості поверхні керованими.

Мікрорельєфні поверхні відносяться до категорії шорсткуватих поверхонь. Давно відомо, що такі поверхні (абразивно пошкоджені), епітаксціальні текстури, а також а-Si мають низький коефіцієнт відбиття і більш високе поглинання. Але ці поверхні є або аморфними, або полікристалічними. Підкладки з мікрорельєфним малюнком після АТ, а також гетеросистеми на їх основі, представляють досконалий монокристал, що розширює їх можливості.

Тому було доцільним, застосовуючи спектроскопічні вимірювання виявити ці можливості, тим більше, які слідує з морфологічних досліджень, виконаних в розділі I, визначаючим могла бути не тільки шорсткість сама по собі. Слід зазначити, що

незважаючи на доволі активне використання мікрорельєфних поверхонь в ряді фотоелектричних приладів, в основному Si фотоперетворювачів, рпн-фотодіодів, фоторезисторів, аналіз літератури виявляє відсутність достатньої кількості відомостей про оптичні характеристики таких поверхонь. В основному предметом вивчення є відбиття такими поверхнями природного світла. Тим часом тільки зіставлення і узагальнення всіх даних оптичної спектроскопії як напівпровідників IV групи, так і  $A^{III}B^V$  напівпровідників з мікрорельєфним морфологією поверхні дозволить прогнозувати їх властивості.

Коли поверхня розділу двох середовищ, на яку падає світова хвиля, має мікрорельєф (шорсткість), характер взаємодії такої поверхні з випромінюванням буде залежати від співвідношення геометричних розмірів мікрорельєфу і даних хвилі випромінювання.

Відомо, що шорстка поверхня, якщо нерівності носять випадковий характер, має два критерії  $h_H$  і  $L_H$  - середньоквадратичне значення висоти і довжину кореляції, відповідно. Для анізотропно травленої поверхні, особливо поліедральних морфології, висота і дана кореляції однозначно залежні і визначаються геометрією. Крім того, середньоквадратичне і середньоарифметичне значення пов'язані  $h_H = 1,1 \bar{h}$ , тому всюди надалі мікрорельєф будемо характеризувати висотою поліедра травлення. Правомірність такої оцінки пізніше підтвердимо порівнянням з теорією Беннета і Портеуза, що пов'язує нерівність поверхні і величину дзеркального відбиття.

За відношенням геометричного розміру мікрорельєфу і довжини хвилі світла мікрорельєфні поверхні можна розділити на дві категорії. Якщо  $\bar{h} \gg \lambda$  тобто, якщо на одному розмірі мікрорельєфу укладається кілька довжин хвиль то така мікрорельєфна поверхня може бути представлена як сукупність певним чином орієнтованих майданчиків. Ці майданчики грають роль дзеркал, що відбивають світло в певних напрямках і результуючий розподіл інтенсивностей відбитого і поглинутого променів визначається законами геометричної оптики. Якщо висота мікрорельєфу близька за

величиною з довжиною хвилі світла або значно менше останньої  $\bar{h} \ll \lambda$ , то починають грати роль дифракційні ефекти, які проявляються в розсіянні світла, які в випадку рівності висоти і довжини хвилі стають резонансними.

Треба зауважити, що класифікувати мікрорельєфні поверхні вкрай важко, оскільки точно вони не підходять під якусь категорію, що пов'язано з важкою, індивідуальною мікроморфологією бічних граней багатогранника, що відображають особливості росту монокристала. До того ж характер взаємодії мікрорельєфної поверхні з випромінюванням може змінюватися в залежності від досліджуваного спектрального діапазону. Для всієї мікрорельєфів, отриманих АТ, характерне поєднання цих двох випадків і повний розгляд мікрорельєфних поверхонь можливо при обліку всіх процесів взаємодії їх з випромінюванням і визначення їх взаємного впливу. Зрозуміло, бажаний загальний підхід, який був би придатний при будь-якому співвідношенні між геометричним розміром і довжиною хвилі світла, однак, єдиної теорії навіть в електродинаміці періодичних структур не існує. У той же час підхід геометричної оптики, не володіючи достатньою спільністю, зручний для апроксимації мікрорельєфних поверхонь як деякий граничний випадок. ,

Виходячи з морфологічних особливостей мікрорельєфа, уявімо його геометричними конфігураціями, зображеними на рис. 2.1.

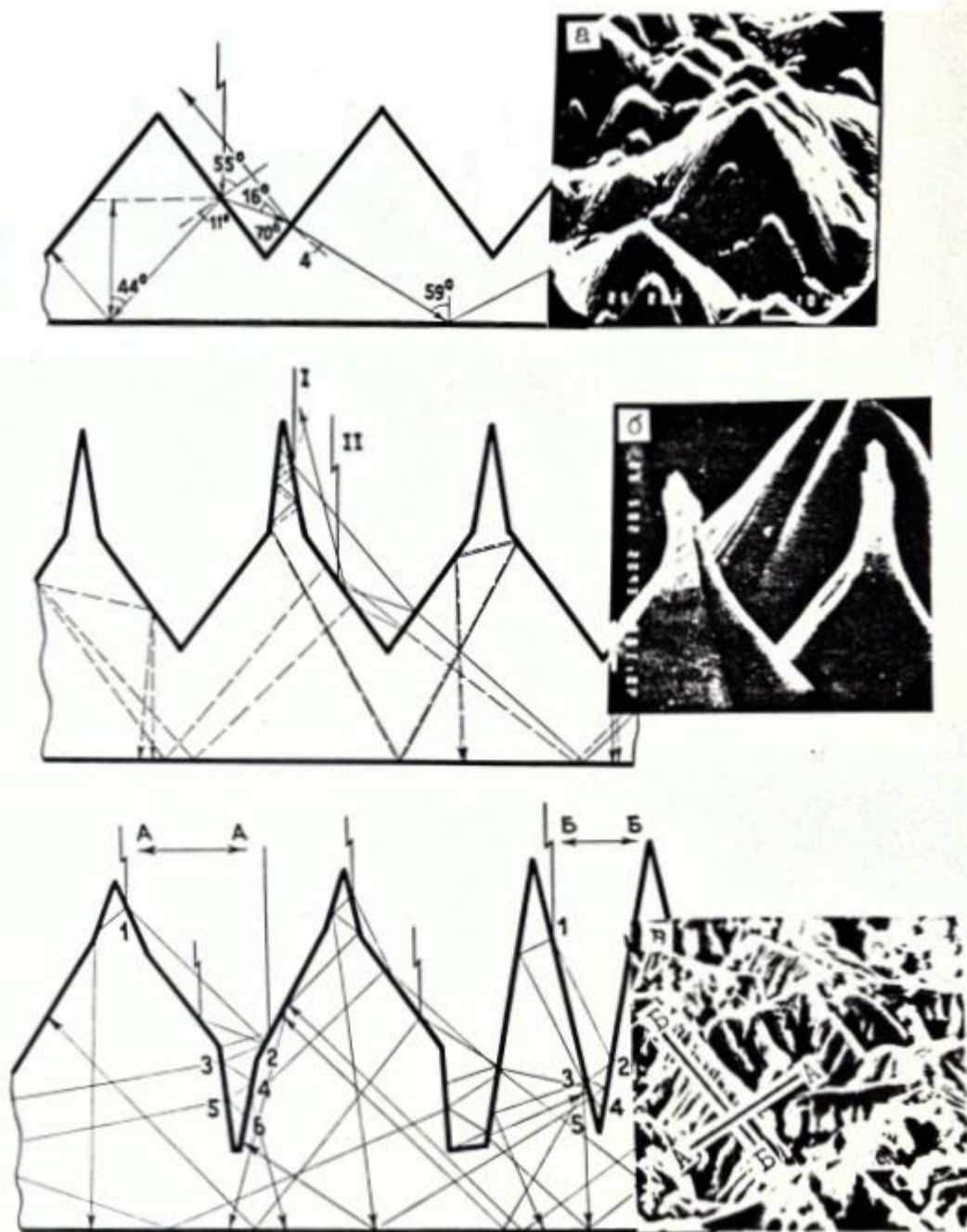


Рисунок 2.1 – “Оптическая” модель микрорельєфу поверхні: а – Si, б – Ge, в – GaAs, і інші  $A^{III}B^V$  напівпровідники. Числа показують кількість відбивання від фронтальної поверхні.



Наявність на поверхні мікрорельєфу призводить до похилого падіння на неї світлового потоку. Закони Снеліуса обумовлюють певний хід променів, характерний для кожної конфігурації. Для всіх напівпровідників габітус мікрорельєфа має загальний кут падіння, що дорівнює куту між площинами  $\{100\}$  і  $\{111\}$  в монокристалах кубічної сингонії,  $55^\circ$ . Тому ми детально розглянемо хід променів світла в такій конфігурації як найбільш загальної і елементарної, хоча це розгляд має обмежене значення і є лише частиною аналізу ходу променів в інших більш складних конфігураціях.

На рис.2.1 а представлений ідеалізований випадок Si періодичного мікрорельєфу. У такій структурі відповідно до законів відбиття і заломлення світла, промінь, падаючи на поверхню грані під кутом  $\sim 55^\circ$ , відбивається від неї під тим же кутом і заломлюється під кутом  $\sim 11^\circ$ . На сусідню грань відбитий промінь падає під кутом  $\sim 16^\circ$ , відбивається під тим же кутом і заломлюється під кутом  $\sim 4^\circ$  в напівпровідник. Якщо реалізується така ситуація, що заломлені в напівпровіднику промінь досягає тильної поверхні, то перший переломлений промінь падає на неї під кутом  $\sim 44^\circ$ , а другий - під кутом  $\sim 59^\circ$ . При плоскій і дзеркальній тильній поверхні переломлений в напівпровіднику промінь на межі поділу його з повітрям, як із середовищем менш оптично щільним, може відбуватися повне внутрішнє віддзеркалення, якщо кут падіння більше мінімального, який визначається з умови внутрішнього відбиття:

$$\varphi_{1\min} \geq \arcsin \frac{1}{n} \quad (2.1)$$

де  $n$ -показник заломлення матеріалу напівпровідника. Для Si  $\varphi_{1\min} = 13,5^\circ$ . Це показує, що явище повного внутрішнього відбиття реалізується для обох заломлених променів. Аналогічне положення може привести мікрорельєф на тильній

поверхні. При цьому картина ходу променів ускладнюється за рахунок можливого повного внутрішнього відбиття від бічних граней. Не ідеалізований випадок (різний габітус, наявність майже плоских ділянок) приведуть до більшої кратності відбиття. Геометричний аналіз показує, що така структура дає багатократне відбиття від фронтальної поверхні і багаторазове повне внутрішнє віддзеркалення від тильної та бокової поверхонь. Останнє спостерігається при сумірності глибини поглинання світла і товщини напівпровідника.

Ускладнення геометрії на Ge і  $A^{III}B^V$  напівпровідниках збільшує кратність відбиття. Геометрична конфігурація мікрорельєфу на Ge (рис.2.1 б) призводить до падіння світла під двома кутами:  $\sim 80^\circ$  - в області списовидної вершини і  $55^\circ$  - в нижній частині чотирикутної піраміди, як в Si, що дає безліч відбитих, заломлених, повністю відбитих променів. У Ge кут повного внутрішнього відбиття  $= 11.3^\circ$ , тобто для кутів  $\varphi_1 \geq \varphi_{1\min}$  і товщини напівпровідника  $\geq$  глибини поглинання світла ефект повного внутрішнього відбиття від тильної і бічних поверхонь Ge проявляється в збільшенні довжини оптичного шляху більш сильному, ніж в Si.

Геометричні конфігурації, якими як найбільш типовими можна апроксимувати дендритні морфології  $A^{III}B^V$  напівпровідників, зокрема арсенідів, схематично зображені на рис.2.1в. Вони представляють два перетини - по AA і BB - перпендикулярно і паралельно головній осі дендрита. Так як в дендритній морфології, первинні осі дендритів розорієнтовані, то можлива ситуація, коли геометрія одного перетину буде взаємодіяти з геометрією іншого перерізу, що відображено в ході променів світла за законами геометричної оптики. З схематичного зображення видно, що кути падіння в дендритних морфологіях, приблизно ті ж, що і в Ge, а якщо йдеться про перетин AA, і маємо один кут падіння  $\sim 80^\circ$ , якщо промінь йде в вітці дендрита - перетин BB. Випромінювання, що приходить по нормалі до плоскої поверхні, зазнає від мікрорельєфу від 3-х і більше відбивання, тобто багатократне віддзеркалення світла, в тому числі і повне внутрішнє (для GaAs  $\varphi_{1\min} = 13,3^\circ$ ), може бути

забезпечене без участі тильної поверхні. Якщо світло доходить до тильної поверхні, то відбувається подальше збільшення довжини оптичного шляху в напівпровіднику. Отже, апроксимуючи мікрорельєфні поверхні моделями геометричних конфігурацій, що відображають структурно-геометричні особливості монокристала, і, застосовуючи закони геометричної оптики при проходженні світла в напівпровідниках з мікрорельєфною морфологією поверхні, можна бачити, що похиле падіння світла призводить до багаторазового відбиття від фронтальної поверхні і багаторазового повного внутрішнього відбиття від тильної і бічних поверхонь. Очевидним наслідком ефектів багаторазового відбиття буде: 1) зміна дзеркального відбиття, 2) зміна розсіювання світла, 3) зміна прозорості напівпровідника.

До сих пір малося на увазі, що відбитий і поглинутий промені характеризуються тільки радіальним кутом. Насправді, питання відбиття і пропуску світла мікрорельєфними поверхнями значно складніше, оскільки вони відносяться до середовищ, що розсіюють світло, і процес розсіювання неминуче стає двовимірним. Для характеристики відбитого променя необхідне введення азимутального кута. Однак, якщо кути розсіювання при дифузному відображенні відрізняються не дуже сильно від кута дзеркального відбиття, то спостереження розсіяного світла можна робити в області падіння.

Апроксимація на основі геометричної оптики допустима, поки при розсіянні на мікрорельєфній поверхні не почнуть проявлятися хвильові властивості світла у вигляді інтерференції променів при відбитті від різних ділянок поверхні грані або дифракції на гранях.

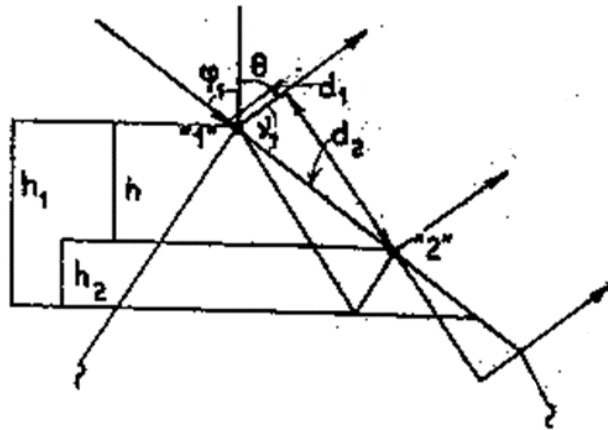


Рисунок 2.2 – До визначення умов інтерференції на мікрорельєфній поверхні

Розглянемо ділянку межі з морфологічною особливістю у вигляді ступенів (рис.2.2) і визначимо умови отримання інтерференції світла на мікрорельєфній поверхні. Якщо кут падіння  $\varphi_1$ , то при відбитті в точках "1" і "2" між відбитими променями виникає різниця ходу

$$d = d_2 - d_1 = h \frac{1 + \cos(\varphi_1 + \theta)}{\cos \varphi_1} \quad (2.2)$$

де  $h$  - проекція відрізка між точками "1" і "2" на нормаль до поверхні,  $h = h_1 - h_2$ ,  $d_2 = \frac{h}{\cos(\varphi_1)}$ ,  $d_1 = \frac{h}{\cos \varphi_1} \cos[180 - (\varphi_1 + \theta)]$ .

Оскільки величина  $h$  змінна, то щоб не виникало хаотичного перемішування фаз від всіх хвиль, і спостерігалася інтерференція, необхідно виконання умови:

$$h \frac{1 + \cos(\varphi_1 + \theta)}{\cos \varphi_1} \leq \lambda \quad (2.3)$$

Це нерівність дійсна в двох випадках:

$$\begin{aligned} 1) \quad h &\leq \lambda \\ 2) \quad h \frac{1+\cos(\varphi_1+\theta)}{\cos \varphi_1} &\leq 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Друга умова досягається, коли  $\varphi_1 \approx \vartheta \rightarrow 90^\circ$ , тобто на мікрорельєфній поверхні при ковзних кутах падіння повинні спостерігатися інтерференційні процеси, що призводять до появи дзеркальної складової відбиття.

## 2.2 Спектри відбиття і пропускання при $\bar{h} \gg \lambda$

Як від будь-якої шорсткої поверхні, відбиття від поверхні з мікрорельєфною морфологією має дзеркальну складову і дифузно-розсіяне випромінювання. Підхід до вивчення відбиття на основі дослідження сумарного відбиття інтегруючою сферою широко поширений і ефективний для оцінки практичних можливостей таких поверхонь, зокрема, в геліотехніці. На ці властивості повинні впливати морфологічні особливості мікрорельєфу, а ще в більшій мірі ступінь заповнення поверхні мікрорельєфом  $Q \in \bar{h}$ .

На рис.2.3 наведено спектр відбиття  $R = R(\lambda)$  для плоских і мікрорельєфних поверхонь 3-х напівпровідників. Дзеркальне відбиття плоских поверхонь, рівне 28,33 і 27% для Si, Ge і GaAs, відповідно, зменшується до 0,8-1% при повному заповненні поверхні мікрорельєфом  $Q = 100\%$ . Проміжні значення  $R$  в міру заповнення поверхні мікрорельєфом, можна знайти в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Оптичні характеристики мікрорельєфних поверхонь

Напівпровідник Характеристика	Ge				GaAs			
1. Коефіцієнт заповнення мікрорельєфом, Q %	0	50	80	100	0	45	70	100
2. Коефіцієнт дзеркального відбиття в області фундаментального поглинання, R %	33	10,4	3,2	0,8	27	6,5	1,2	0,8
3. Кут Брюстера, °	76	70	60	60	72,5	67	60	55
4. Величина $R_{p\ min}$ , %	3,8	2,6	1,5	0,8	2	1,6	0,72	0,64
5. Коефіцієнт пропускання в області прозорості, %	65	12	6	2,5	57	3,5	2	1,2
6. Зміщення краю пропускання, мкм		0,03		0,2				0,3
7. Півширина індикатриси розсіяння, °								
$\varphi_1 = 10^\circ$	10	10	35	70	5	10	20	70
$\varphi_1 = 20^\circ$	12	19	60	70	10	16	45	80
$\varphi_1 = 55^\circ$	12	12	40	40	10	17	115	115
6. Відношення сумарного коефіцієнту плоских і мікрорельєфних поверхонь								
$\varphi_1 = 10^\circ$	1	2,1	2,6	5,1	1	1,65	4,1	3,2
$\varphi_1 = 20^\circ$	1	1,75	2,8	6,6	1	1,75	4,3	4,5
$\varphi_1 = 55^\circ$	1	2,9	2,5	9,4	1	2,3	3,5	4,6

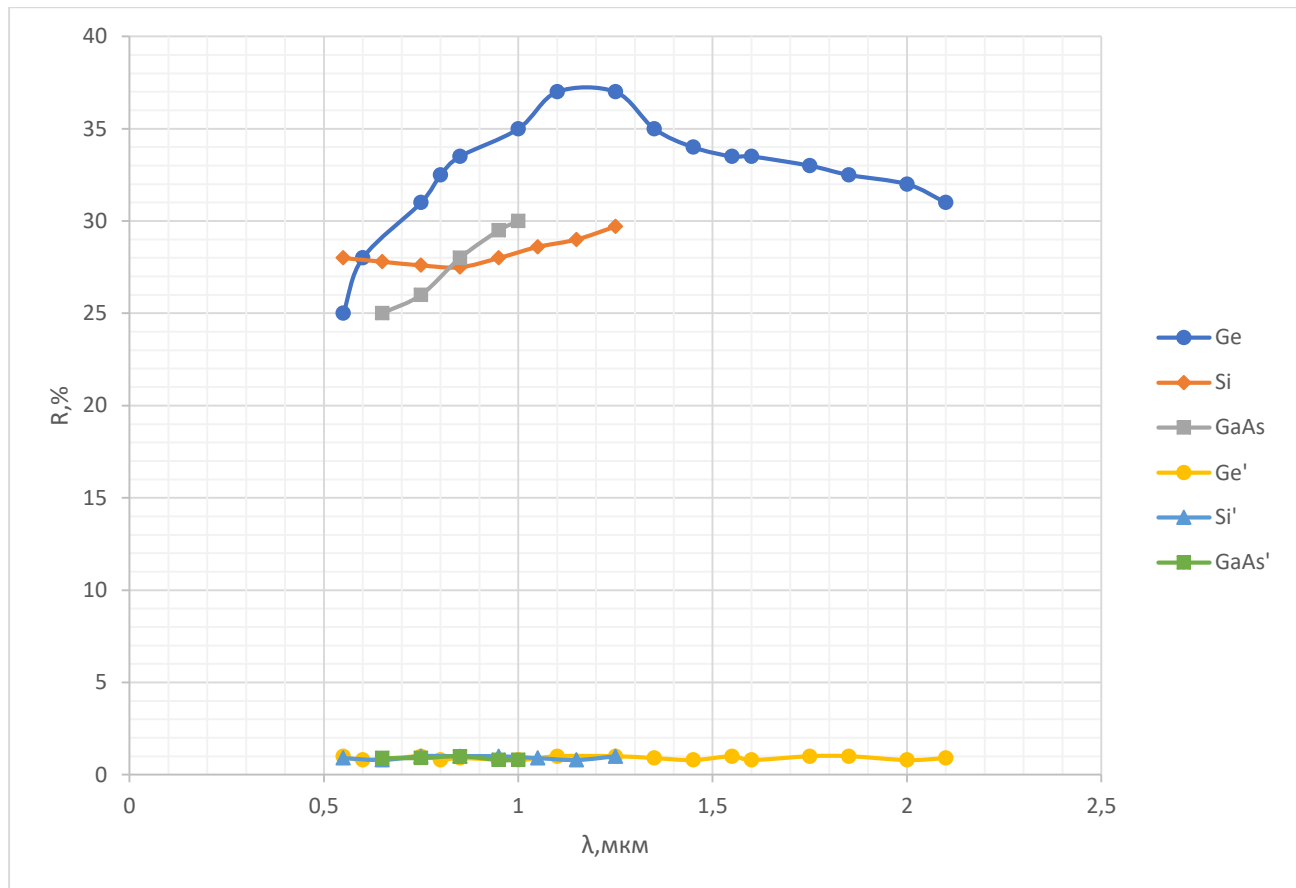


Рисунок 2.3 – Спектри відбиття плоских (*Si*, *GaAs*, *Ge*) і мікрорельєфних (*Si'*, *GaAs'*, *Ge'*) поверхонь напівпровідників

Кутові залежності  $R$  плоских і мікрорельєфних поверхонь виявляють такі особливості. Компонента коефіцієнта відбиття світла, поляризованого нормально до площини падіння  $R_n$  для плоских поверхонь (рис.2.4) являє собою повільно зростаючу функцію кута падіння до 50% при  $\varphi_1 = 80^\circ$ . Компонента коефіцієнта відбиття світла, поляризованого в площині падіння  $R_p$ , дорівнює  $R_n$  при  $\varphi_1 = 10^\circ$ , а при  $\varphi_1 = \arctg$  досягає мінімуму, а потім зростає до 10 ... 15 % при  $\varphi_1 = 80^\circ$ . Кут мінімального відбиття - кут Брюстера - дорівнює  $\varphi_{BSi} = 73^\circ, \varphi_{BGe} = 76^\circ, \varphi_{BGaAs} = 72.5^\circ$ , а значення мінімуму  $R_{p\ min} = 2\%$  для *Si*, 3,8 % для *Ge* і 2% для *GaAs*. У природному світлі, коли  $R = 1/2 (R_n + R_p)$ , спостерігається слабка залежність  $R(\varphi_1)$ .

У міру заповнення поверхні мікрорельєфом спостерігається зменшення абсолютних значень  $R_n$  і  $R_p$ , зменшується  $R_{pmin}$ , мінімум стає менш вираженим і зміщується в бік менших кутів падіння. При  $Q = 100\%$   $R_n$ ,  $R_p$  і  $R$  при  $\varphi_1 = 10^\circ$  досягають своєї мінімальної величини  $\sim 0,8\%$ , відбувається подальше зміщення  $R_{pmin}$  в сторону менших кутів падіння і навіть повне зникнення мінімуму, що чітко видно в разі мікрорельєфу на Ge (рис.2.4 - 2.9)

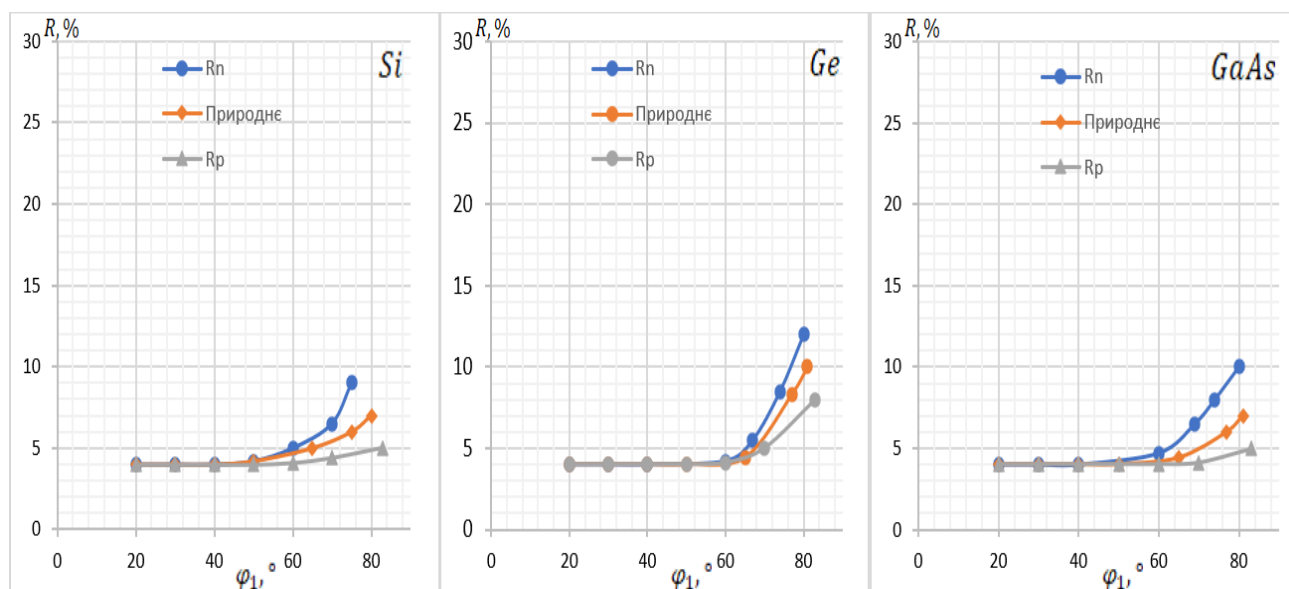


Рисунок 2.4 – Кутіві залежності коефіцієнта дзеркального відбиття природного і поляризованого світла для заповненості мікрорельєфу  $Q = 0\%$



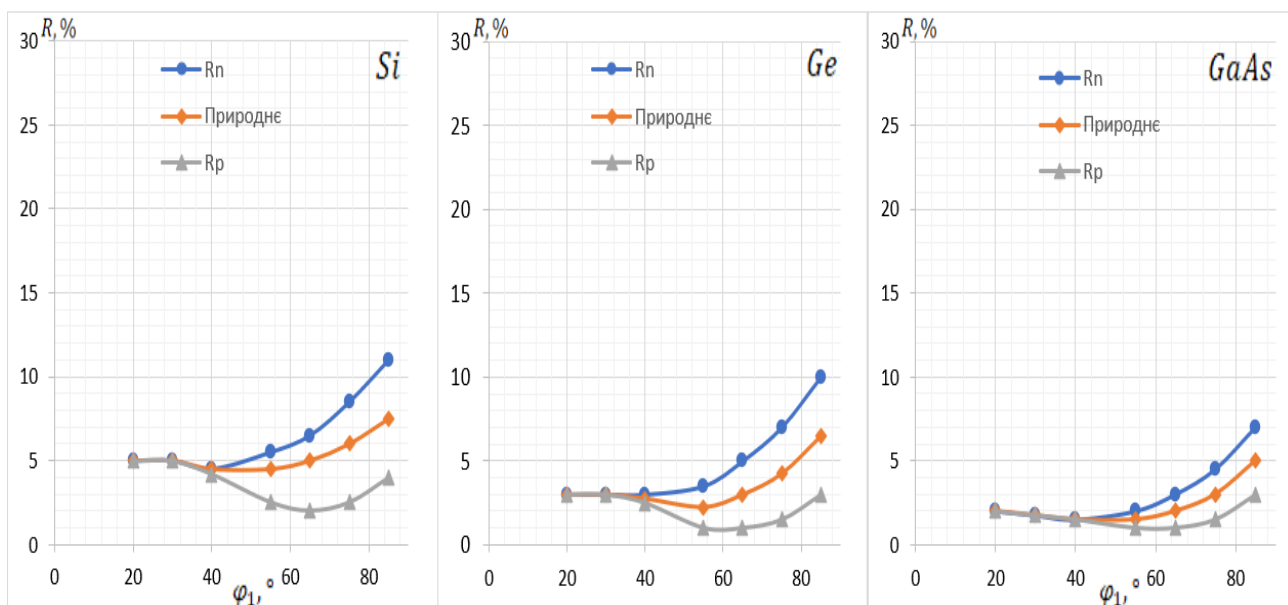


Рисунок 2.5 – Кутові залежності коефіцієнта дзеркального відбиття природного і поляризованого світла для заповненості мікрорельєфу  $Q = 40 - 50\%$

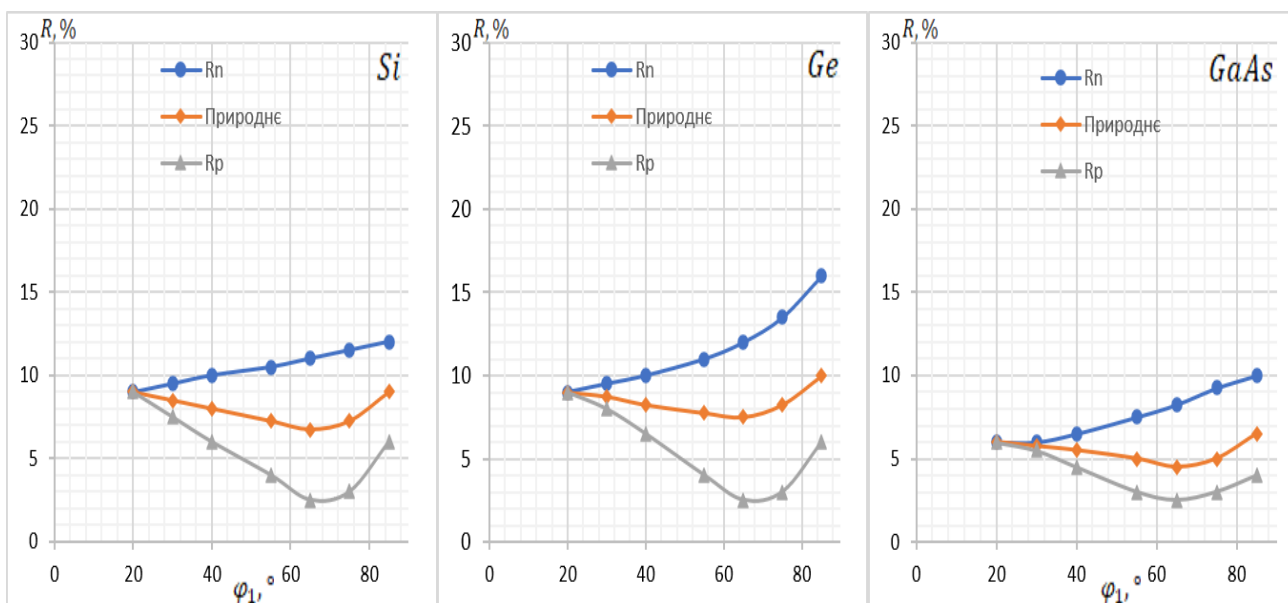


Рисунок 2.6 – Кутові залежності коефіцієнта дзеркального відбиття природного і поляризованого світла для заповненості мікрорельєфу  $Q = 60 - 80\%$

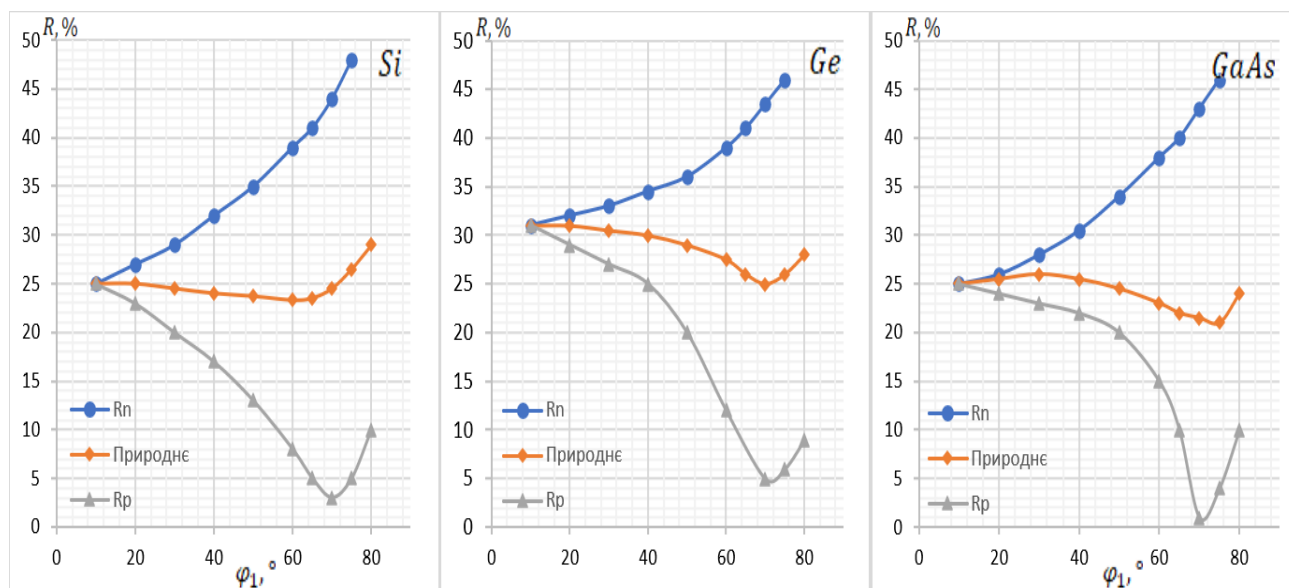


Рисунок 2.7 – Кутові залежності коефіцієнта дзеркального відбиття природного і поляризованого світла для заповненості мікрорельєфу  $Q = 100\%$

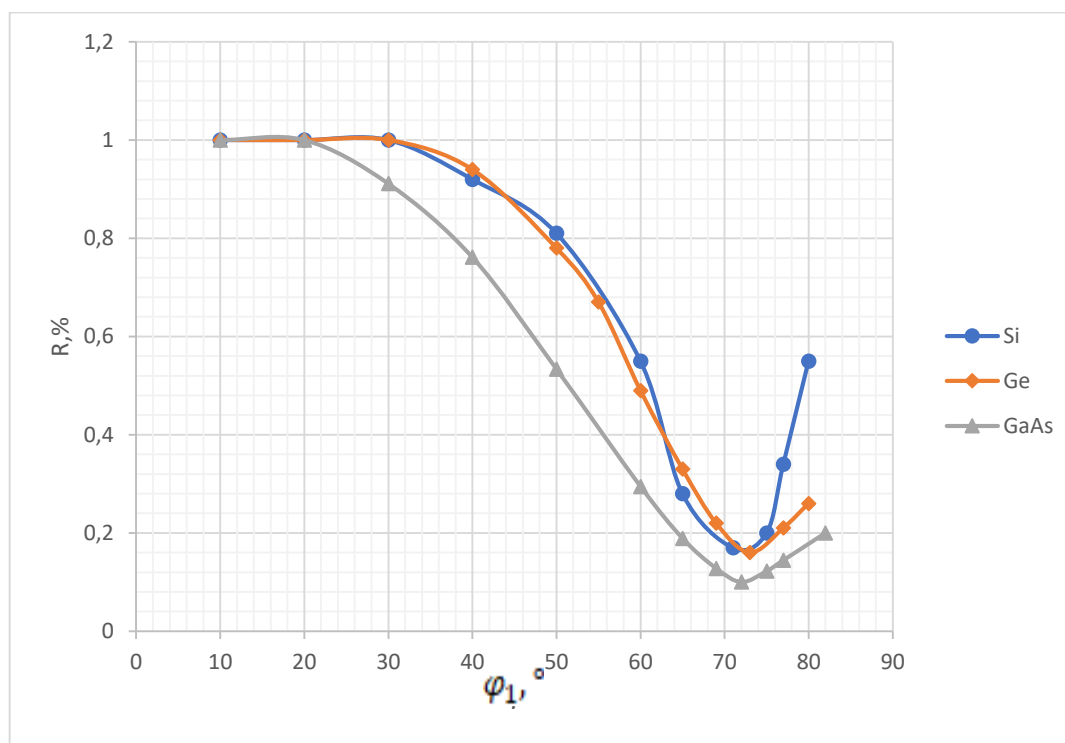


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття світла, поляризованого в площині , що перпендикулярна площині падіння для  $Q = 0\%$

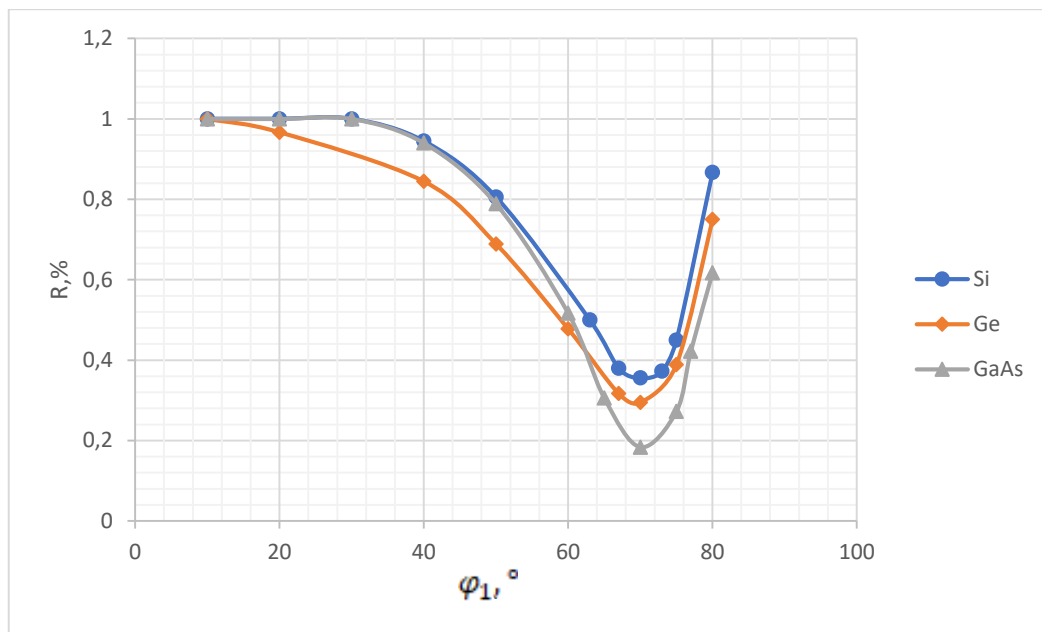


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття світла, поляризованого в площині , що перпендикулярна площині падіння для  $Q = 40 - 50\%$

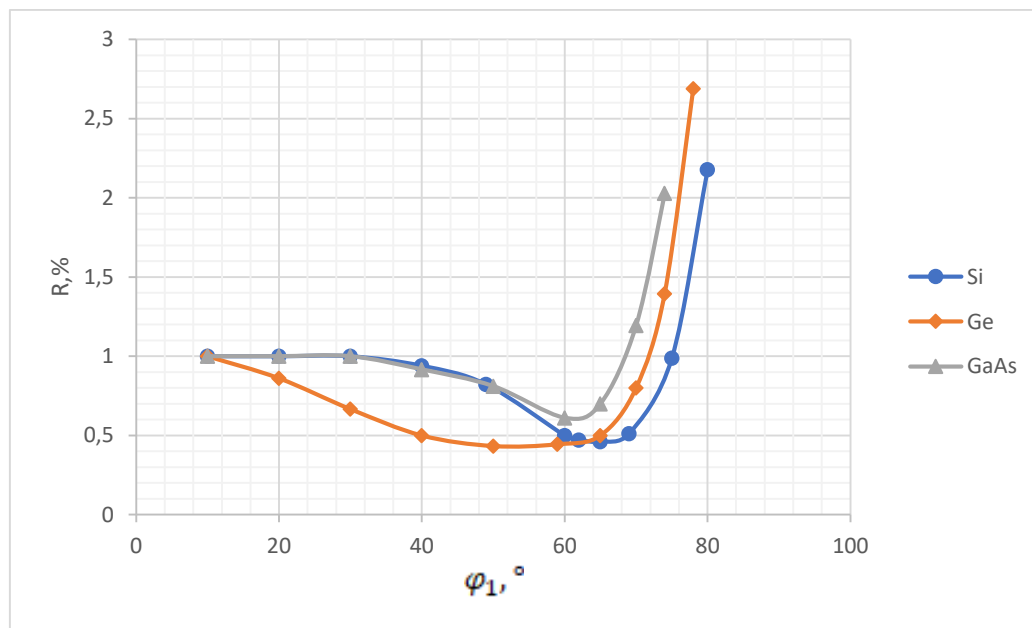


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття світла, поляризованого в площині , що перпендикулярна площині падіння для  $Q = 60 - 80\%$

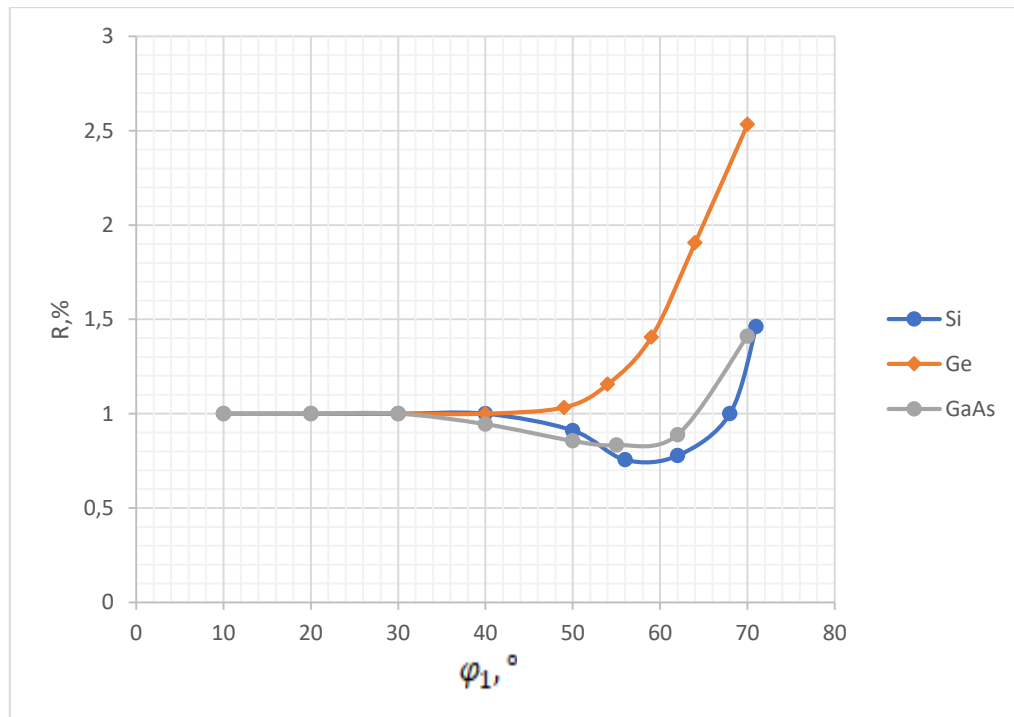


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта дзеркального відбиття світла, поляризованого в площині , що перпендикулярна площині падіння для  $Q = 100\%$

Відомо, що вимірювання відбиття при куті Брюстера дозволяють точно визначити показник заломлення  $n$ . Як було описано вище, кожен напівпровідник має свій кут Брюстера. На мікрорельєфі виникає ситуація, коли відбувається зміна положення  $R_{pmin}$ , при цьому досить істотні, пов'язані з  $Q$ . Віднести ці зміни за рахунок зміни  $n$ , скажімо поки не можливо, а можливо за рахунок того, що в міру заповнення мікрорельєфом, напівпровідник стає все більш поглинаючим середовищем. Тому поняття кут Брюстера, як характеристика матеріалу втрачає сенс, і ми введемо поняття псевдокут Брюстера  $\phi_{PB}$ , характеристики, можна сказати універсальної, мікрорельєфа як поглинаючого середовища. Псевдокут Брюстера - це кут, відрахований від нормалі до плоскої поверхні, на якій створено мікрорельєф, коли  $R_p$  показує мінімум. Зміна ( $\phi_{PB}$  і  $R_p$  від  $Q$  наведені в таблиці 2.1.

З рис. 2.4 випливає, що при  $Q = 100\%$  і  $0^\circ < \varphi_1 < 60^\circ$  практично відсутня залежність  $R_p$ ,  $R_n$  від  $\varphi_1$ , що є свідченням поляризаційного виродження мікрорельєфних поверхонь. Коли  $\varphi_1 > 60^\circ$  спостерігається збільшення дзеркального відбиття до 10 ... 15 % при  $\varphi_1 = 80^\circ$ .

### 2.3 Кутова структура розсіяного випромінювання.

Дифузно розсіяне випромінювання від мікрорельєфної поверхні випромінювалося як через залежність коефіцієнта віддзеркалення від кута падіння  $R = R(\varphi_1)$  при фіксованому вугіллі відбиття ( $\varphi_2 = \text{const}$ ), так і через залежність коефіцієнта відбиття від кута відбиття  $R = R(\varphi_2)$  при фіксованому куті падіння ( $\varphi_1 = \text{const}$ ). Перша залежність визначає кут захоплення випромінювання. Друга - дає ступінь дифузності поверхні - індикатриси розсіювання. Ці залежності мають багато спільного у впливі морфологічних особливостей мікрорельєфу і ступеня заповнення їм поверхні, тому було доцільним дослідження детально останньої залежності, тобто індикатриси розсіювання як найбільш інформативною характеристики розсіює середовища. Тим більше, що вона дає можливість визначити сумарний коефіцієнт відбиття з урахуванням фактору розсіювання (табл 2.1).

Досліджуємо зв'язок інтенсивності і кутового розподілу розсіювання з морфологічними особливостями мікрорельєфної поверхні і ступенем заповнення поверхні мікрорельєфом. Розглянемо Індикатрису  $S_i$  поверхні. При цьому зручніше досліджувати не абсолютну функцію  $R = R(\varphi_2)$ , а  $R(\varphi_2)/R(\varphi_{2 \max})$ , де  $R(\varphi_{2 \max})$ , - значення відбиття при  $\varphi_1 = \varphi_{2 \max}$ . Плоскі поверхні ( $Q = 0\%$ ) мають вузьку індикатрису з різко вираженим максимумом при куті дзеркального відбиття, що відповідає малій дифузності. Якщо ступінь дифузності оцінювати напівшириною індикатриси, то для плоских поверхонь вона порядку  $10^\circ$ ; на різних стадіях

заповнення поверхні мікрорельєфом відбувається розширення індикатриси, зміна її форми, зміщення максимуму в бік великих кутів падіння. При  $Q = 100\%$  напівширина індикатриси досягає сотні градусів, розширення максимуму для  $\varphi_1 = 55^\circ$   $R/R_{max} = 1$  спостерігається в інтервалі кутів  $55^\circ \leq \varphi_1 \leq 65^\circ$ , тобто протягом  $10^\circ$  максимум стає чисто дифузним, а також з'являється залежність півширини від кута падіння. Збільшуючи кут падіння, можна спостерігати зворотний перехід від дифузного розсіювання до дзеркального відбиття, про що згадувалося в попередньому параграфі.

Дослідження індикатрис дозволяє динамічно простежити процес виникнення дзеркальної складової у мікрорельєфній поверхні з ростом кута падіння.

Аналогічну кутову структуру випромінювання демонструють мікрорельєфні поверхні Ge і GaAs. Але при всій загальності поведінки, пов'язаного зі зміною ширини індикатриси і положення її максимуму від  $Q$  і  $\varphi_1$  слід зазначити і деякі особливості, пов'язані з морфологією мікрорельєфу. Так, для Ge і GaAs поверхонь, особливо для останніх, при  $\varphi_1 = 40^\circ$  і  $Q = 100\%$  форма індикатриси - трапецеїдальна або близька до неї, яка потім зі збільшенням  $\varphi_1$  трансформується в колообразну; перехід до дзеркального відбиття відбувається для кутів падіння, менших, ніж для Si. Тобто повністю заповнені мікрорельєфом поверхні Ge і GaAs розсіюють світло більш ізотропно для  $\varphi_1 = 40^\circ$ , ніж Si, і дають більш різкий перехід до дзеркального відбиття в області ковзаючих кутів падіння, що пов'язано з морфологічними особливостями мікрорельєфу Ge і GaAs, що полегшують інтерференцію дифрагованих променів.

## 2.4 Спектральний розподіл пропускання.

Ефекти багатократного відбиття від тильної і бічних поверхонь мікрорельєфу неминуче повинно вести до зміни прозорості напівпровідника. Тому був вивчений

взаємозв'язок між пропусканням напівпровідника і ступенем заповнення поверхні мікрорельєфом.

Наведено спектри пропускання Si, Ge і GaAs з плоскими і мікрорельєфними ( $Q = 100\%$ ) поверхнями. Видно, що мікрорельєф поверхні зменшує пропускання світла в області прозорості напівпровідника, а також зсуває криві пропускання в довгохвильову область. При цьому виявляється, що найбільш ефективною для цих цілей виявляється дендритна морфологія GaAs. Так, при  $Q = 100\%$  пропускання в області прозорості  $T_{Si} = 3,3\%$ ,  $T_{Ge} = 2,5\%$ ,  $T_{GaAs} = 1,2\%$  а при  $Q = 0\%$   $72\%$ ,  $65\%$  і  $57\%$ , відповідно, а зсув кривих пропускання, підрахований при приведенні кривих пропускання на їх максимальне значення, взятий при  $T = 1\%$ , дорівнює в Si і Ge  $0,2$  мкм, а в GaAs  $0,3$  мкм. Остання обставина може свідчити про те, що поряд зі збільшенням довжини оптичного шляху світла в напівпровіднику при наявності мікрорельєфу, що дає зсув кривих пропускання в довгохвильову область, можуть діяти фізичні фактори (в основному для  $A^{III}B^V$  напівпровідників), що призводять до зсуву краю поглинання.

З викладеного випливає, що анізотропно травлені поверхні напівпровідників є ефективною пасткою світла, забезпечуючи практично повне поглинання випромінювання, і деполяризаторами випромінювання.

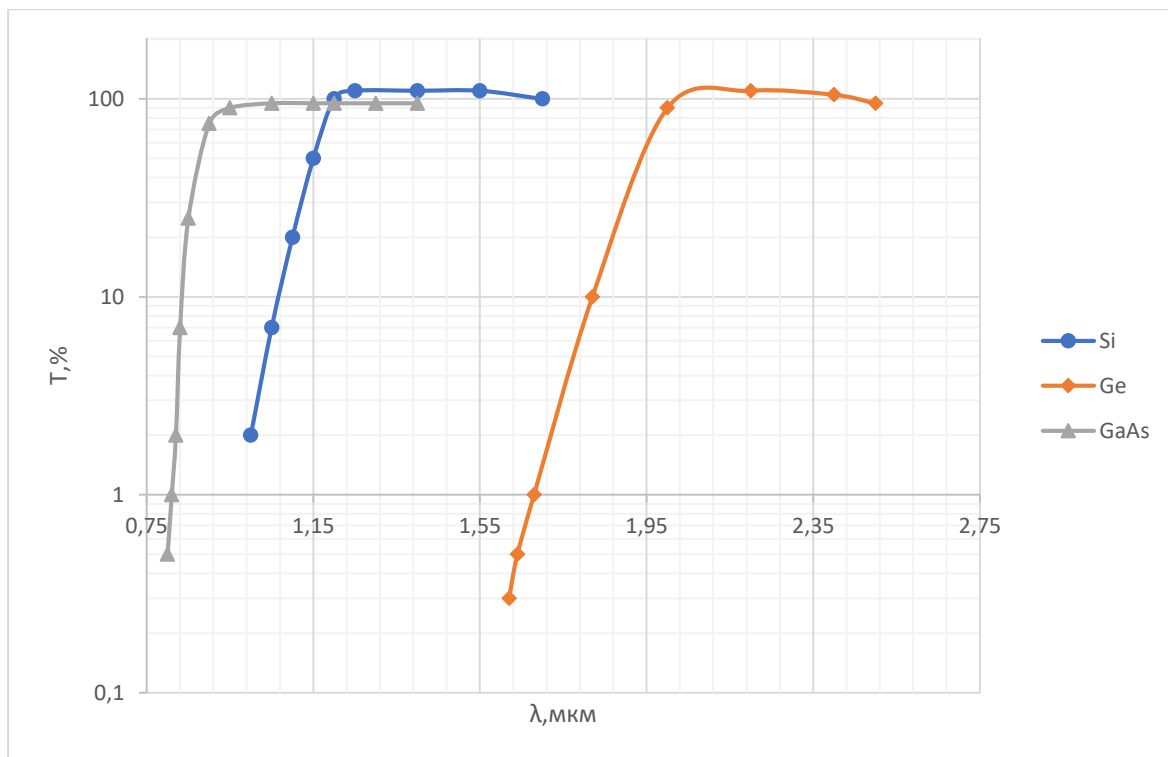


Рисунок 2.12 – Спектри пропускання плоских поверхонь

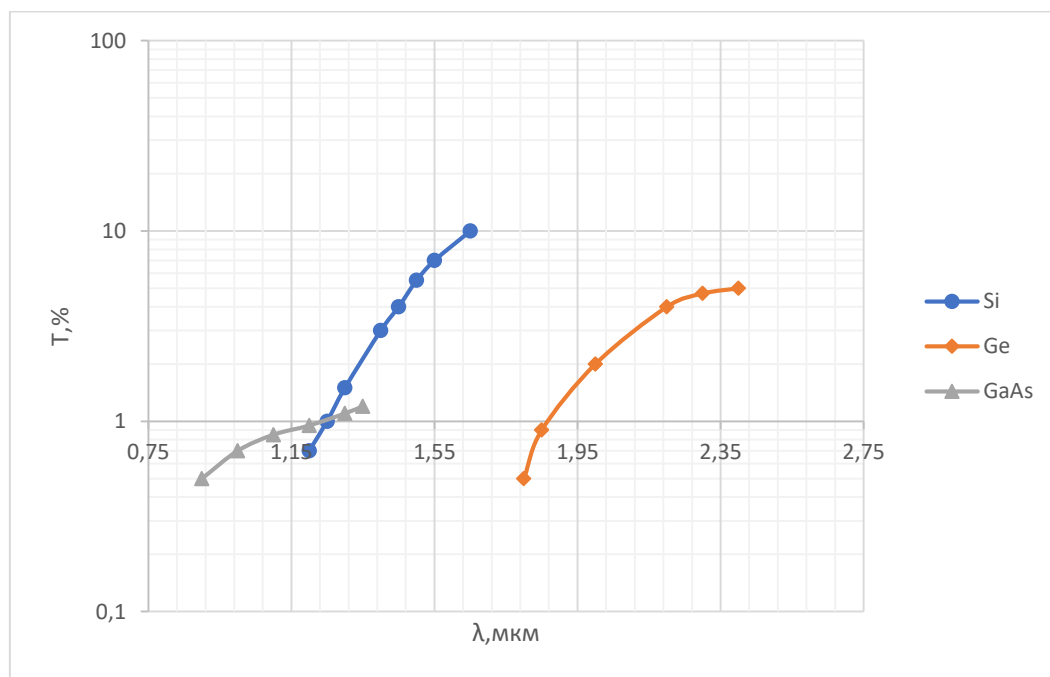


Рисунок 2.13 – Спектри пропускання мікрорельєфних поверхонь



## 2.5 Спектри відбиття і пропускання при $\bar{h} \leq \lambda$ .

Як уже зазначалося, характер впливу мікрорельєфу на випромінювання залежить від співвідношення геометричних розмірів мікрорельєфу і довжини хвилі світла. За співвідношенням останніх мікрорельєфні поверхні можуть бути поглинаючими щодо одного спектрального діапазону і мати високу відбивну здатність щодо більш довгохвильового випромінювання. Цей перехід спостерігається, коли геометричні розміри збігаються з довжиною хвилі випромінювання, тобто при  $\bar{h} \leq \lambda$  мікрорельєфні поверхні поведуться як плоскі поверхні. Такий вибіркового характеру впливу мікрорельєфу на випромінювання забезпечує селективність оптичних властивостей анізотропно трюєних поверхонь.

На рис.2.10 представлена залежність відбиття від  $\lambda$  плоскої і 4-х мікрорельєфних Si поверхонь з  $\bar{h} \leq 1, 3 \dots 4, 5 \dots 7, 15$  мкм в інтервалі  $2 \dots 50$  мкм. Видно, що для  $\bar{h} = 15$  мкм перехід до дзеркального відбиття спостерігається при  $\lambda = 20$  мкм, зі зменшенням  $\bar{h}$  цей перехід зміщується в короткохвильову область, а при  $\bar{h} = 1$  мкм він відбувається при  $\lambda = 2$  мкм. Для поверхонь, представлених кривою 3 рис.2.10 були зняті індикатрисы відбиття при різних довжинах хвиль, які також демонструють перехід до "плоскій поверхні". Треба відзначити, що крива 2 рис.2.10 показує, що на мікрорельєфі можна отримати спектральну характеристику поверхні, майже ідеальну для сонячних перетворювачів. Аналогічна селективність отримана на всіх напівпровідниках .

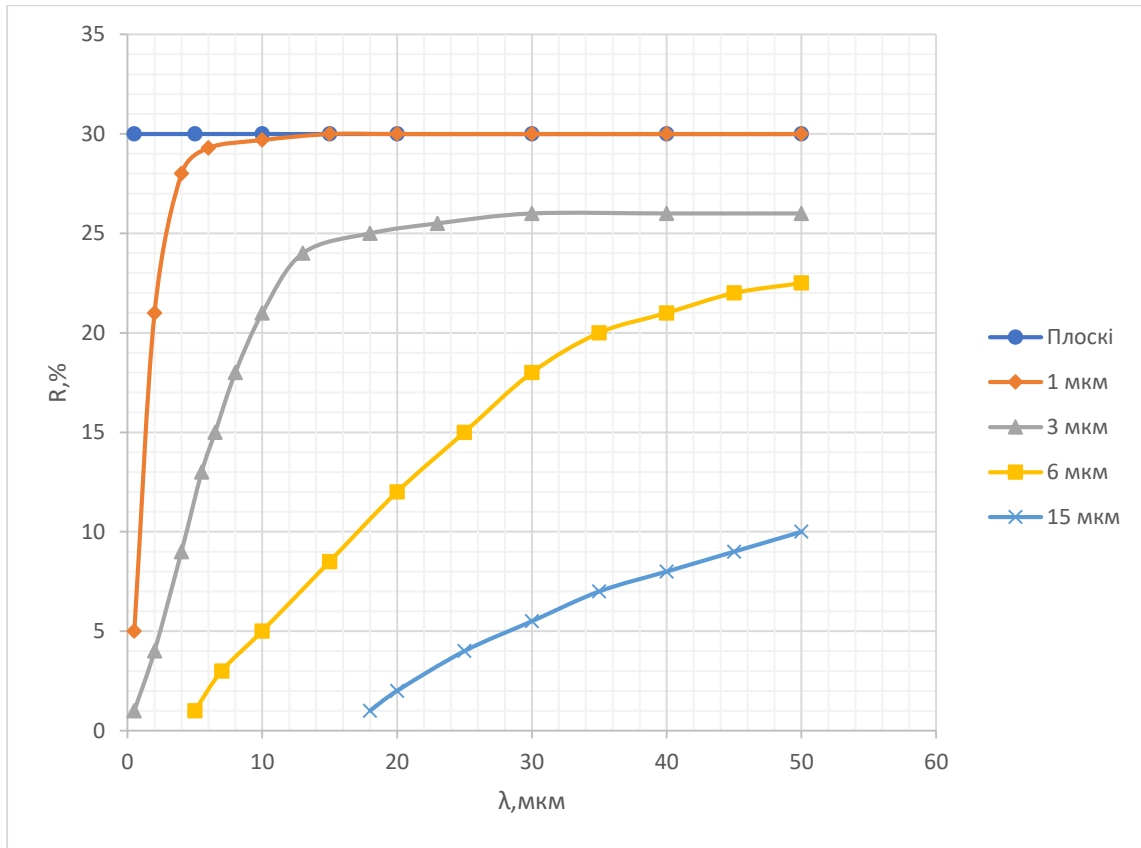


Рисунок 2.14 – Залежність відбиття довжини хвилі світла для Si поверхонь : 1- плоскі поверхні, 2,3,4,5, -мікрорельєфні з  $\bar{h}$  : 2 – 1 мкм, 3 – 3...4 мкм, 4 – 5...7 мкм, 5 – 15 мкм

При  $\bar{h} \gg \lambda$  і якщо нерівності мікрорельєфу мають гаусівський розподіл по висоті, величина відбиття, що спостерігається в напрямку дзеркального відбиття :

$$\frac{R}{R_0} = \exp \left\{ - \left( \frac{4\pi h_H}{\lambda} \right)^2 \right\} + \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{4\pi h_H}{\lambda} \right)^2 \right) \right] \left[ 1 - \exp \left\{ - 2 \left( \frac{\pi h_H \beta}{m\lambda} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.5)$$

де  $R_0$  - відбиття плоскій поверхні,  $h$  і  $m$  - середньоквадратичні значення висоти і нахилу (довжини кореляції) мікрорельєфу,  $\beta$  - половина апертури вимірювального приладу. Перший член вище наведеного рівняння дає дзеркальне відбиття, другий - дифузне. Для  $\frac{h_n}{\lambda} \geq 0,1$  другим членом можна знехтувати і розкласти перший член за ступенями  $\frac{h_n}{\lambda}$ . Позначивши зменшення відбиття, пов'язане з мікрорельєфом  $\Delta R = R_0 - R$ , отримаємо:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left( \frac{4\pi h_n}{\lambda} \right)^2 \quad (2.6)$$

Звідки середньоквадратичне значення висоти мікрорельєфу:

$$h_n = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\Delta R}{R}} \quad (2.6)$$

Дані рис.2.11 дозволяють знайти це значення для кривих 2 і 3 ( $\frac{\Delta R}{R} \geq 0,9$ ) і порівняти його із середнім арифметичним  $\bar{h}$ .

Досліджені оптичні спектри: відображення, пропускання, напівпровідників з анізотропним травленням поверхонь і неплоских границь розділу. Розкриті загальні закономірності, показано, що мікрорельєфна морфологія поверхні є радикальним засобом зниження втрат випромінювання на відбиття і пропускання світла в напівпровідниках. Показана залежність оптичних властивостей мікрорельєфних поверхонь від співвідношення геометричного розміру мікрорельєфу до довжини хвилі випромінювання, ступеня заповнення поверхні мікрорельєфом. На прикладі GaAs

досліджені зміни параметрів зонної структури в мікрорельєфному шарі, процесів розсіювання генерованих світлом носіїв і особливостей фотолюмінесценції.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРОВІДНОСТІ В НАПІВПРОВІДНИКАХ IV ГРУПИ І $A^{III}B^V$ НАПІВПРОВІДНИКАХ З АНІЗОТРОПНО ТРАВЛЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

#### 3.1 Фотоефект в Si $p^+ - n$ структурах.

Як відомо, загальною вимогою для матеріалу напівпровідникового фотоприймача, заснованого на явищі внутрішнього фотоефекту, є наявність сильного (100 %) поглинання квантів випромінювання валентними електронами з утворенням електронно-діркових пар. Ефективність поглинання плоскими, з високою ступенем гладкості і площинності полірованими, традиційно використовуваними в фотоприймачах поверхнями напівпровідників, істотно обмежується втратами падаючого випромінювання на відбиття від поверхні напівпровідника і пропускання через напівпровідник. Ці втрати в області довжин хвиль 0,5 ... 2,5 мкм можуть досягати 30 ... 50 %, а це рівнозначно зменшенню чутливості вдвічі. Збільшення пропускання через напівпровідник в області краю смуги фундаментального поглинання призводить до швидкого спаду спектральної чутливості і обмеження спектрального діапазону детектування випромінювання. Однак вимоги раціонального використання падаючого випромінювання є не єдиними для матеріалу фотоприймача. Так, наприклад, при перетворенні сонячної енергії в електричну для досягнення оптимального ККД, необхідні поверхні з відповідною спектральною селективністю. Для приймальної частини оптико-локаційних систем дуже важливим параметром при огляді простору є ефективне поле зору фотоприймача. Підвищення ефективності перетворення оптичного сигналу в електричний в волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) пов'язано з поверхнями, що відповідають ідеальній основі для прецизійного суміщення оптичних волокон з фотоприймачами. Традиційні плоскі поверхні

напівпровідникових фотоприймачів для вирішення цього кола завдань, який не претендує на повноту, а обраний як ілюстрація можливостей і переваг анізотропно травлених мікрорельєфних поверхонь, вимагає додаткових конструктивних і технологічних зусиль.

Результати дослідження оптичних властивостей мікрорельєфним поверхонь і їх технологічна керованість показали, що вони мають резерви:

- 1) збільшення інтегральної фоточутливості, особливо, до слабопоглинаючого випромінювання (внутрішня пастка світла),
- 2) поліпшення просторового детектування (зовнішнє захоплення випромінювання),
- 3) якісно нові властивості і характеристики (варізонність в мікрорельєфному шарі  $A^{III}B^V$  напівпровідників).

Так як конструкція і геометрія структури, її технологічна реалізація відіграє визначальну роль в отриманні тих чи інших властивостей і характеристик, ми коротко будемо зупинятися і на цій стороні питання за винятком тих випадків, коли це вже було зроблено в попередніх розділах.

Si  $p^+ - n$  структура була меза конфігурацією в стабільній геометричній формі. Вона представляла собою усічену піраміду, основа якої мала орієнтацію  $\{100\}$ , а бічні грані були виконані в орієнтації  $\{111\}$ , при цьому площини  $\{111\}$  були природними поверхнями монокристалу.  $P - n$  перехід створювався дифузією з легованих окислів в одній з основ піраміди і мав негативний кут скося, рівний куту між площинами  $\{100\}$  і  $\{111\}$ , тобто  $\sim 55^\circ$ . Для формування такої конфігурації застосовувався цикл технологічних операцій планарної технології і спрямоване профілювання. Відмінність мікрорельєфної конструкції від плоскої полягало в тому, що дифузія домішки проходила в рельєфну підкладку, отриману за технологією анізотропного травлення. Критерієм мікрорельєфу служив псевдокут Брюстера менше  $60^\circ$ .  $P - n$  перехід повторював конфігурацію мікрорельєфу. Глибина залягання  $p - n$  переходу,

визначена за методом шар-шліфу становила 1 мкм. Використовувалася підкладка Si {100} n-типу з  $\rho = 1$  Ом·см, легована Р або As, дифузанти містив бор ( $B_2O_3$ ).  $P^+ - n$  перехід був різкий. Площина переходу  $\sim 0,6-0,8$  мм<sup>2</sup>. Поверхнева концентрація  $N_s = 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Послідовність технологічних операцій можна углядіти з рис.3.1, де позиції 1 і 2 представляють кінцеву структуру в першому випадку з плоскою, а у другому - з мікрорельєфною світлоприймаючою областю.

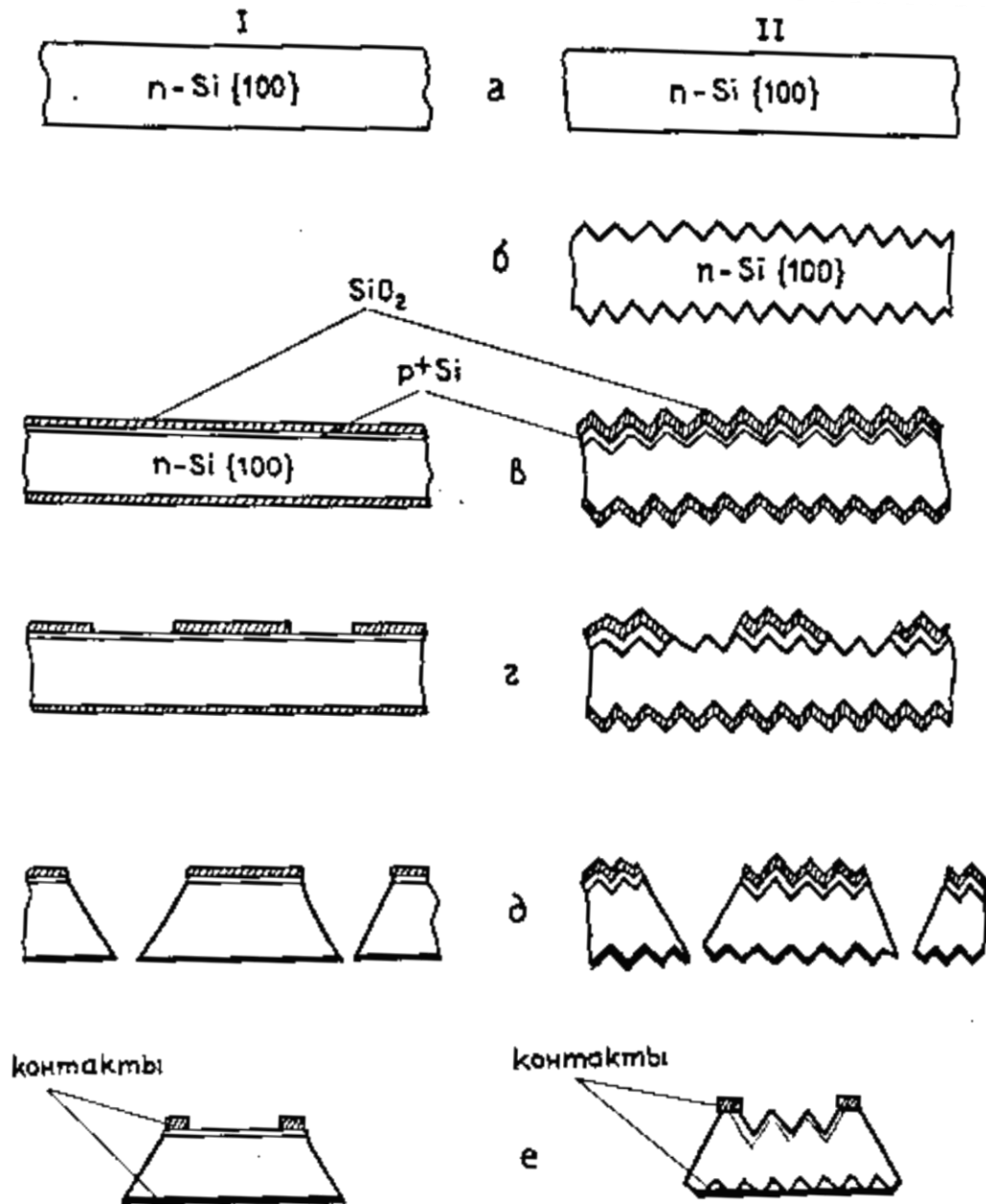


Рисунок 3.1 – Послідовність технологічних операцій отримання  $p^+ - n$  структури на плоских (1) і мікрорельєфних (2) поверхнях : а – вихідна поверхня Si, б – анізотропне травлення, в – дифузія і термічне окиснення, г – фотолітографія, д – направлене профілювання, е – кінцева структура



Спектри фотоструму зворотно зміщеного (напруга зсуву 3В)  $p^+ - n$  переходу при модульованому освітленні з плоскою і рельєфною світло приймаючою областю  $p - n$  переходу наведені на рис.3.2.

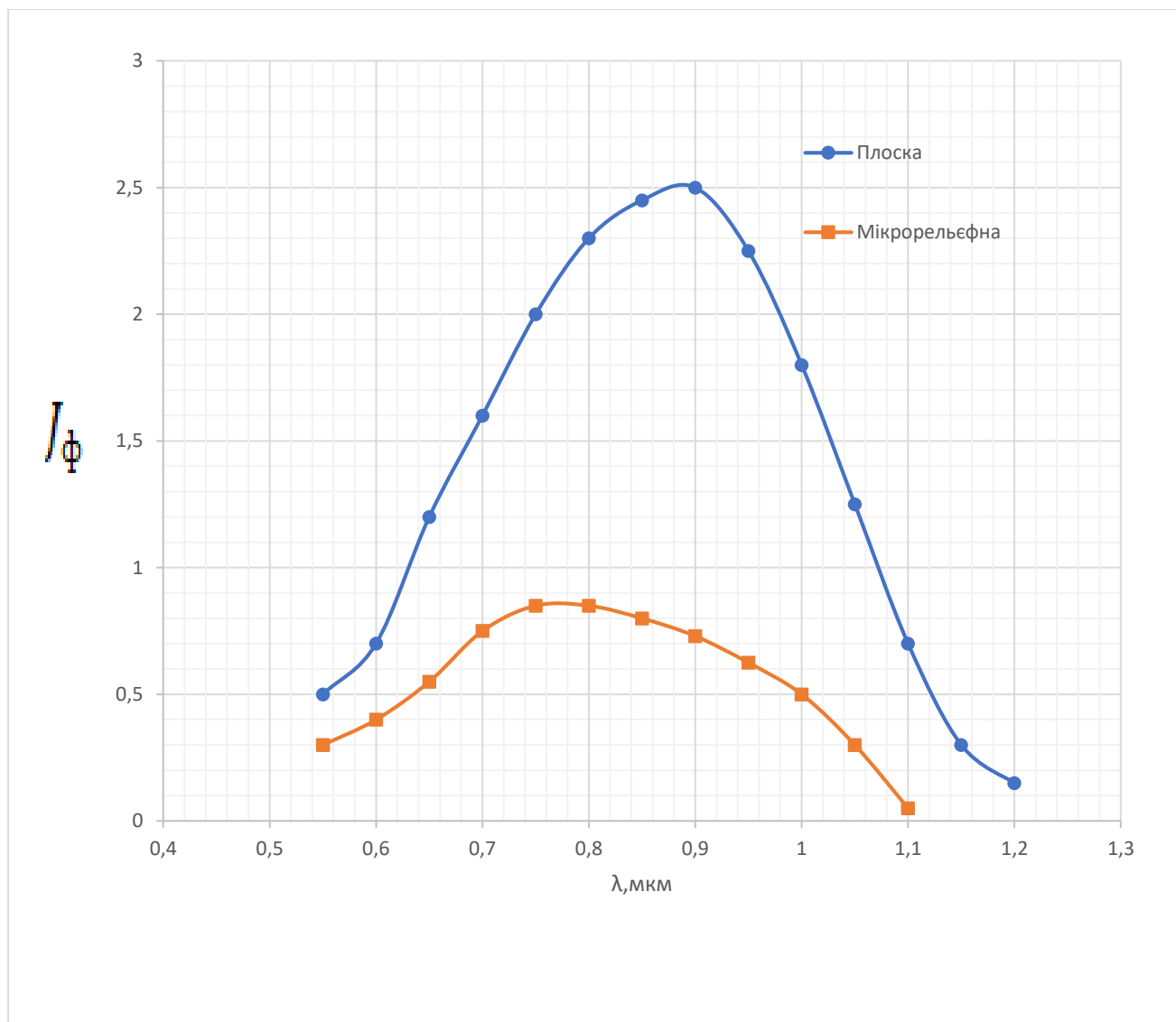


Рисунок 3.2 – Спектральна характеристика Si фотодіоду з плоскою і мікрорельєфною світлоприймаючою областю  $p^+ - n$  переходу

З порівняння характеристик слідує, що наявність мікрорельєфу призводить до збільшення фоточутливості у всьому спектральному діапазоні смуги власного поглинання Si в порівнянні з плоскою світлоприймаючою областю. Особливо це збільшення істотно в ближній ІЧ області, тобто для слабо поглинаючого світла. Так, для  $\lambda = 0,55$  мкм ( $\kappa d = 300$  - сильно поглинаюче світло, де  $\kappa$  - коефіцієнт поглинання світла,  $d = 3 \cdot 10^{-2}$  см - товщина підкладки),  $(J_{\Phi_{\text{мр}}}/J_{\Phi_{\text{пл}}} = 1,75$ , де  $J_{\Phi_{\text{мр}}}$  і  $J_{\Phi_{\text{пл}}}$  - фотострум мікрорельєфного і плоского  $p^+ - n$  переходу, відповідно. Для  $\lambda = 0,9$  мкм ( $\kappa d = 15$ )  $J_{\Phi_{\text{мр}}}/J_{\Phi_{\text{пл}}} = 2,9$ , а для  $\lambda = 1,06$  мкм (слабо поглинаюче світло,  $\kappa d = 0,3$ ) досягає 3,6-4. У припущенні, що кожен поглинений квант світла створює одну електронно-дірковий пару, квантова ефективність або фотострум при сильно поглинаючому світлі ( $\kappa d \gg 1$ ) пропорційний  $1-R$ . При плоскому р-п переході  $1 - R = 0,7$ , при мікрорельєфному  $1 - R = 0,95-0,98$ , що повинно приводити до збільшення чутливості в 1,4 рази, що і спостерігається для  $\lambda = 0,55$  мкм. Для слабо поглинаючого світла ( $\kappa d \leq 1$ ), фотострум пропорційний  $\kappa d$ . При наявності мікрорельєфу фотострум визначається як описаним вище фактором, так і довжиною оптичного шляху світла в напівпровіднику, яка за рахунок багаторазових повних внутрішніх відображень, може перевищувати товщину підкладки у багато раз. Остання визначається як морфологією мікрорельєфу, так і розмірами зразка.

Зв'язок між ефективним полем зору  $\Omega_{\text{еф}}$  і фоточутливістю  $S(\lambda)$  визначається виразом:

$$\Omega_{\text{еф}} = \frac{1}{S_{\varphi_1=0}} \int_{\varphi_1=0}^{x/2} \int_{\theta=0}^{2x} S(\varphi_1, \theta) \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 d\varphi_1 d\theta \quad (3.1)$$

де  $\theta$  - азимутальний кут.

У розділі 3 було зроблено припущення можливості використання тільки радіального кута для падаючих, відбитих і поглинутих променів, яке підтвердилося дослідженням індикатрис розсіювання і характеристик захоплення випромінювання. Тому кутовий розподіл фоточутливості було досліджено в площині падіння світла і дає в принципі плоске ефективне поле зору.

Кутова залежність фоточутливості приведена на рис. 3.3-3.4 для 3-х довжин хвиль 0,65, 0,9 і 1,05 мкм. Видно, що ефективне поле зору, яке визначається на рівні 0,5 максимальної фоточутливості, для плоского  $p^+ - n$  переходу становить  $+ 10 \dots 20^\circ$ , в той час як мікрорельєфний  $p^+ - n$  перехід має  $\Omega_{\text{еф}} = 60 \dots 70^\circ$ . Слід зазначити, що в досліджуваній структурі з малим  $p - n$  переходом найбільше  $\Omega_{\text{еф}}$  в порівнянні з плоским  $p - n$  переходом спостерігається на  $\lambda = 0,65$  мкм, що, можливо, пов'язано з кращими умовами збирання носіїв мікрорельєфним  $p - n$  переходом. Коли ж носії фотоструму генеруються в базі, то колективування переходом кілька погіршується і це призводить, до зниження  $\Omega_{\text{еф}}$ .

Таким чином, при світлоприймаючої області  $p - n$  переходу з мікрорельєфом, псевдокут  $\varphi_{\text{пб}} = 60^\circ$ , вирішується завдання збільшення фоточутливості на  $\lambda = 1,06$  мкм, розширення ефективного поля зору фотоприймача при порівняно високій швидкодії.

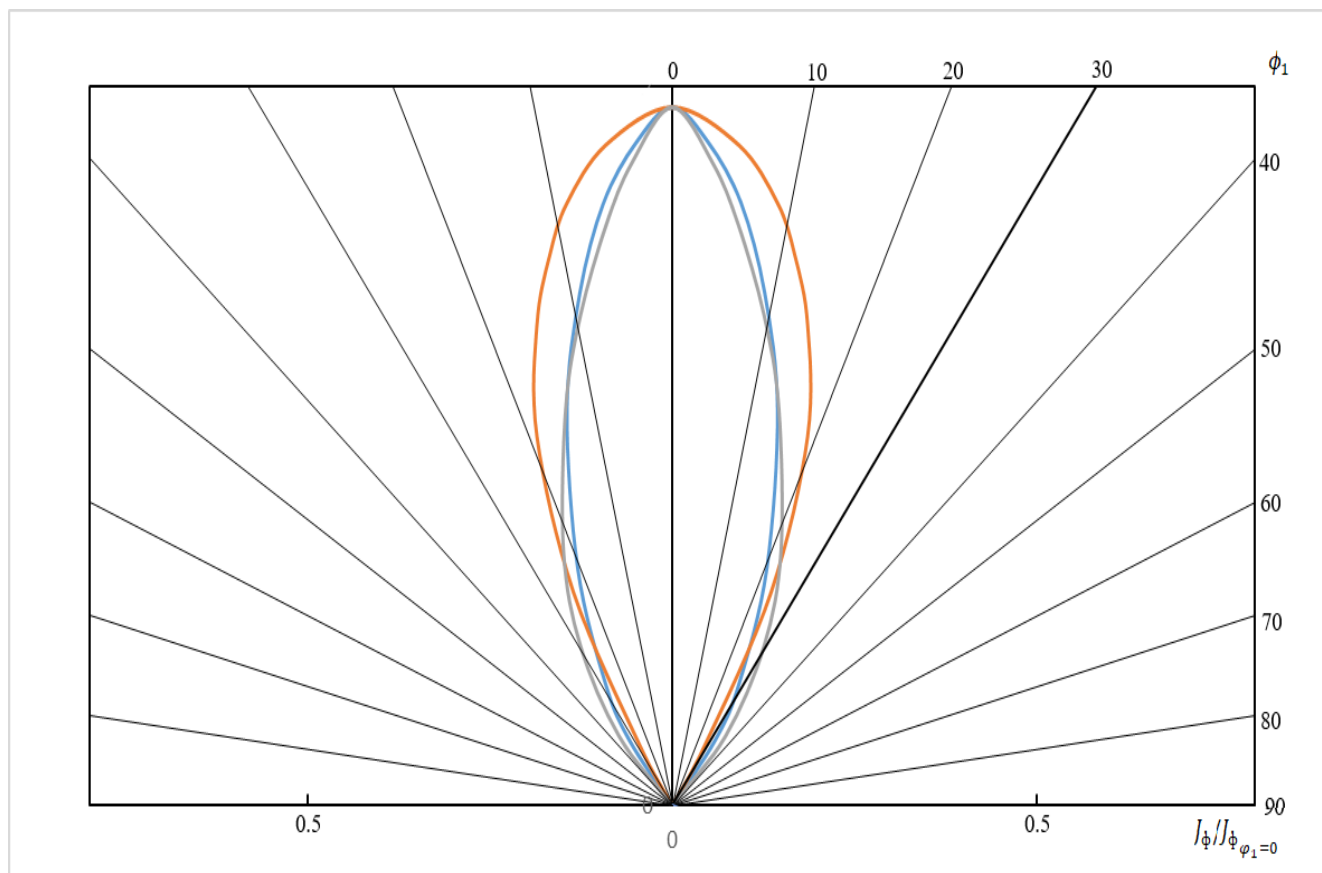


Рисунок 3.3 – Кутовий розподіл чутливості Si фотодіодів з плоскою світлоприймаючою областю  $p^+ - n$  переходів : 1 -  $\lambda = 0,65$  мкм, 2 -  $\lambda = 0,9$  мкм, 3 -  $\lambda = 1,06$  мкм

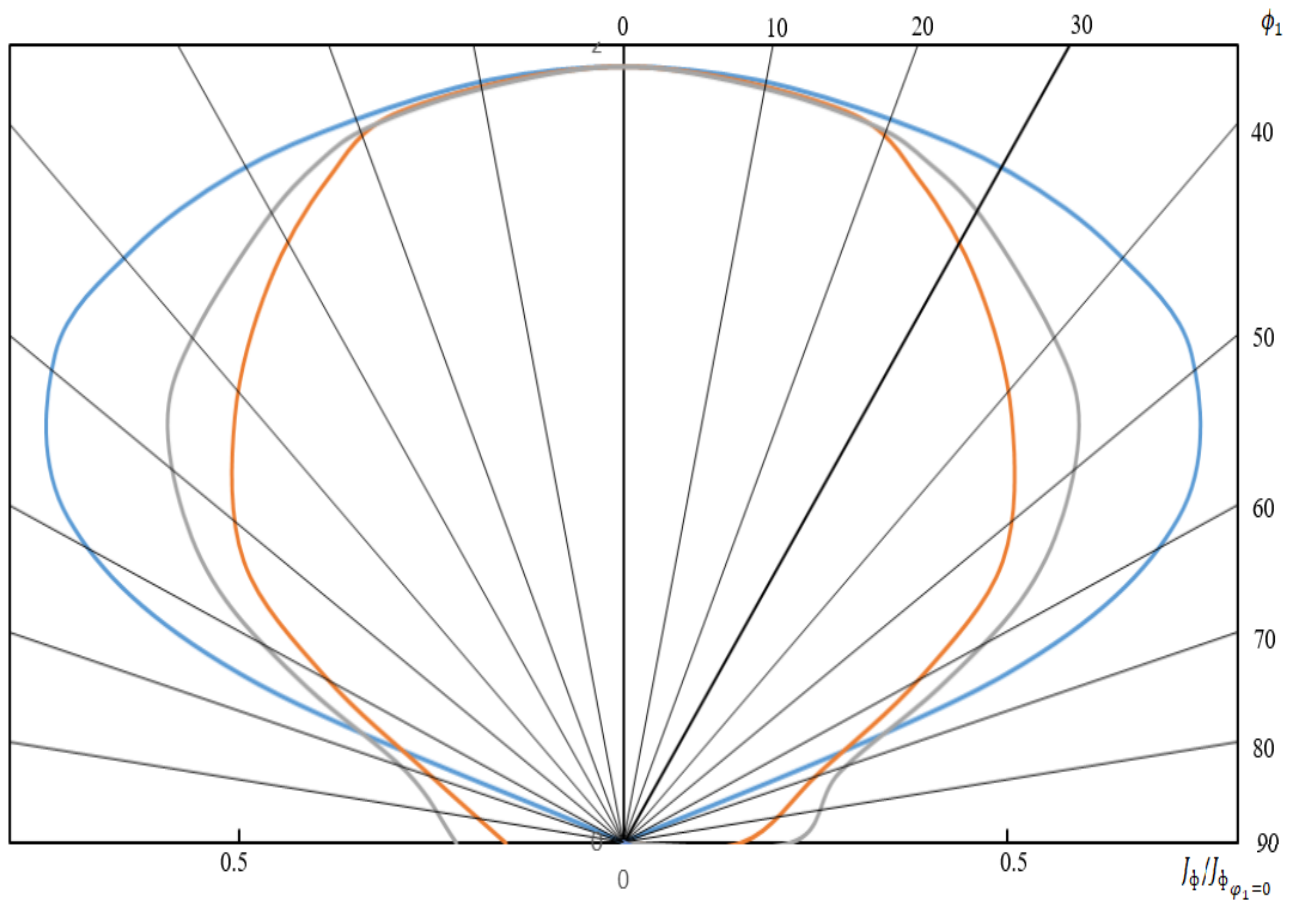


Рисунок 3.4 – Кутовий розподіл чутливості Si фотодіодів з плоскою світлоприймаючою областю  $p^+ - n$  переходів : 1 -  $\lambda = 0,65$  мкм, 2 -  $\lambda = 0,9$  мкм, 3 -  $\lambda = 1,06$  мкм

### 3.2. Фотоефект в структурах фоторезисторів на $A^{III}B^V$ напівпровідниках

Перш за все, слід зазначити, що останнім часом характеризується відродженням фоторезисторів і використанням їх в якості детекторів світлових імпульсів пікосекундної тривалості. Вдале поєднання швидкодії і високої ефективності було завжди і залишається проблемою № 1 при розробці фотоприймачів всіх типів.

Розглянемо конструкцію і технологію фоторезистора, отриманого АТ напівізолюючих матеріалів нелегованого GaAs

Фоторезистор мав планарну конструкцію. Він складався з підкладки прямокутної форми з розмірами  $3 \dots 4 \times 1,5 \dots 2 \times 0,25 \dots 0,3 \text{ мм}^2$ . Контакти на основі In наносилися на плоский зразок стандартної обробки з міжелектродною відстанню  $1,5 \dots 2 \text{ мм}$ . Після проведення вимірювань спектрів фотопровідності плоский зразок піддавався АТ у відповідних середовищах для утворення дендритних морфології і оксидної фази в разі GaAs. Потім  $As_2O_3$  видалявся в лужному травнику і далі слідувало поетапне травлення дендритних гілок. Часові інтервали були аналогічними при дослідженні ЕО, але оскільки при дослідженні фотопровідності застосовувався напівізолюючий матеріал ( $\rho_{GaAs} = 10^7 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), а ЕО вимірювалося на матеріалі з концентрацією  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , кореляції можливі тільки якісні.

Спектри фотопровідності вимірювалися при модульованому освітленні, кімнатній температурі, прикладених полях  $E = 0,2 \dots 2,5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ . Досліджувалися енергетичні та квантові криві спектральної чутливості. Перші застосовувалися, щоб простежити загальну тенденцію зміни спектрів у видимій та ІЧ областях спектра при описаних вище обробках. Другі вимірювалися при постійній кількості падаючих квантів  $\eta = 1,4 \cdot 10^{13} \text{ квант/с} \cdot \text{см}^2$  - в основному при оцінці рекомбінаційних параметрів.

Звернемося до спектрів рис.3.4. Видно, що поряд з власної фотопровідністю спостерігається домішкова фоточутливість, величина якої для плоского зразка в максимумі фоточутливості становить  $0,2 \dots 0,8$  власної фоточутливості і практично не залежить від прикладеної напруги, що узгоджується з раніше відомими даними. Максимум домішкової фоточутливості розташований при  $1,3 \text{ мкм}$  ( $0,95 \text{ еВ}$ ) і приписується переходу з основного стану. Після АТ домішкова фоточутливість збільшується більш, ніж на порядок з максимумом при  $1,4 \dots 1,5 \text{ мкм}$  ( $0,885 \dots 0,826 \text{ еВ}$ ), з'являються нерегулярності при  $1,7 \text{ мкм}$  ( $0,73 \text{ еВ}$ ) і  $1,9 \text{ мкм}$  ( $0,65 \text{ еВ}$ ). Світло,

збільшуючи свою довжину шляху на мікрорельєфі, зачіпає більше центрів, що проявляється в збільшенні домішкової фоточутливості. Що ж стосується власної фотопровідності, то збільшення її нерівномірне в межах власної лінії.

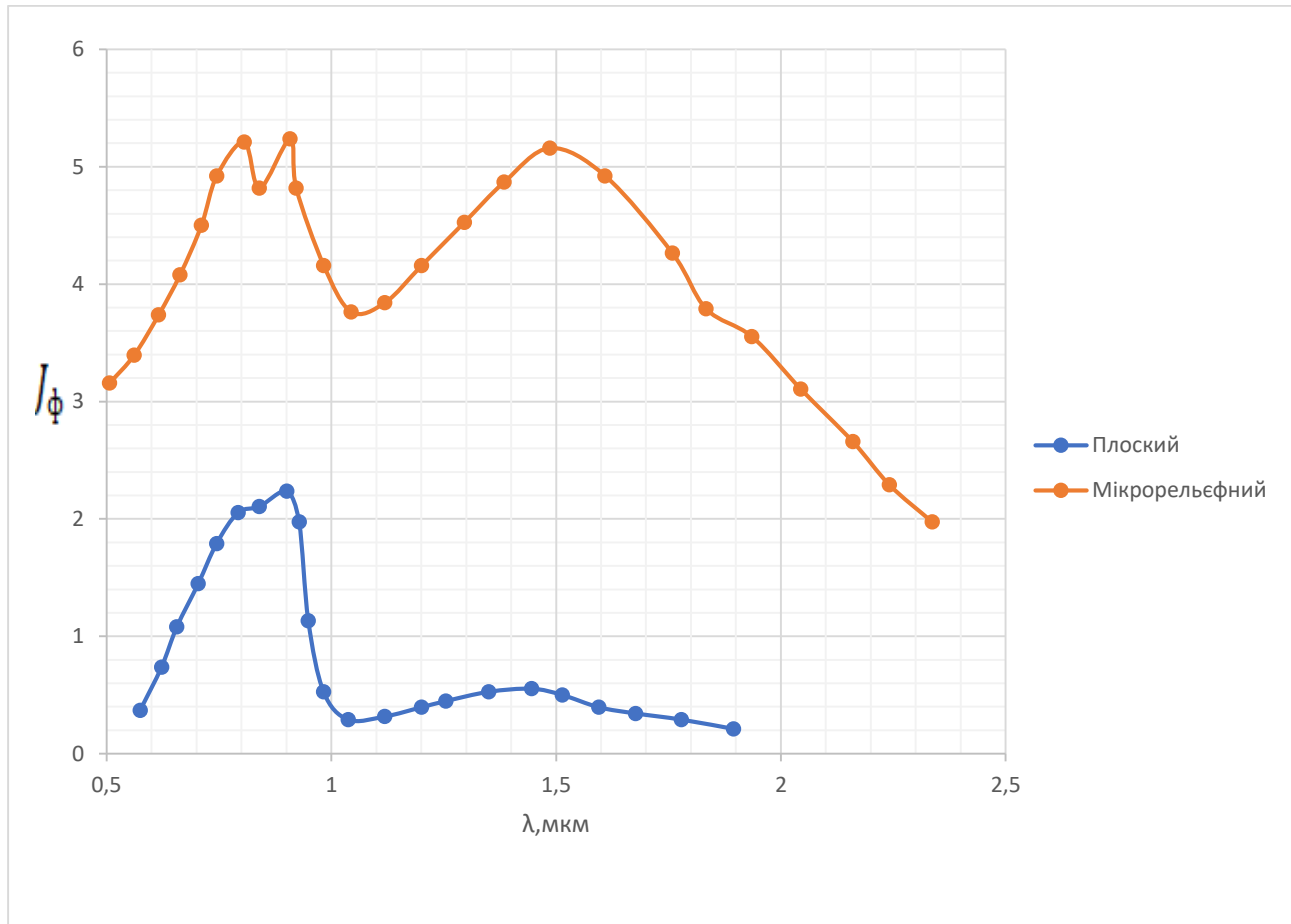


Рисунок 3.5 –Спектральний розподіл фоточутливості GaAs

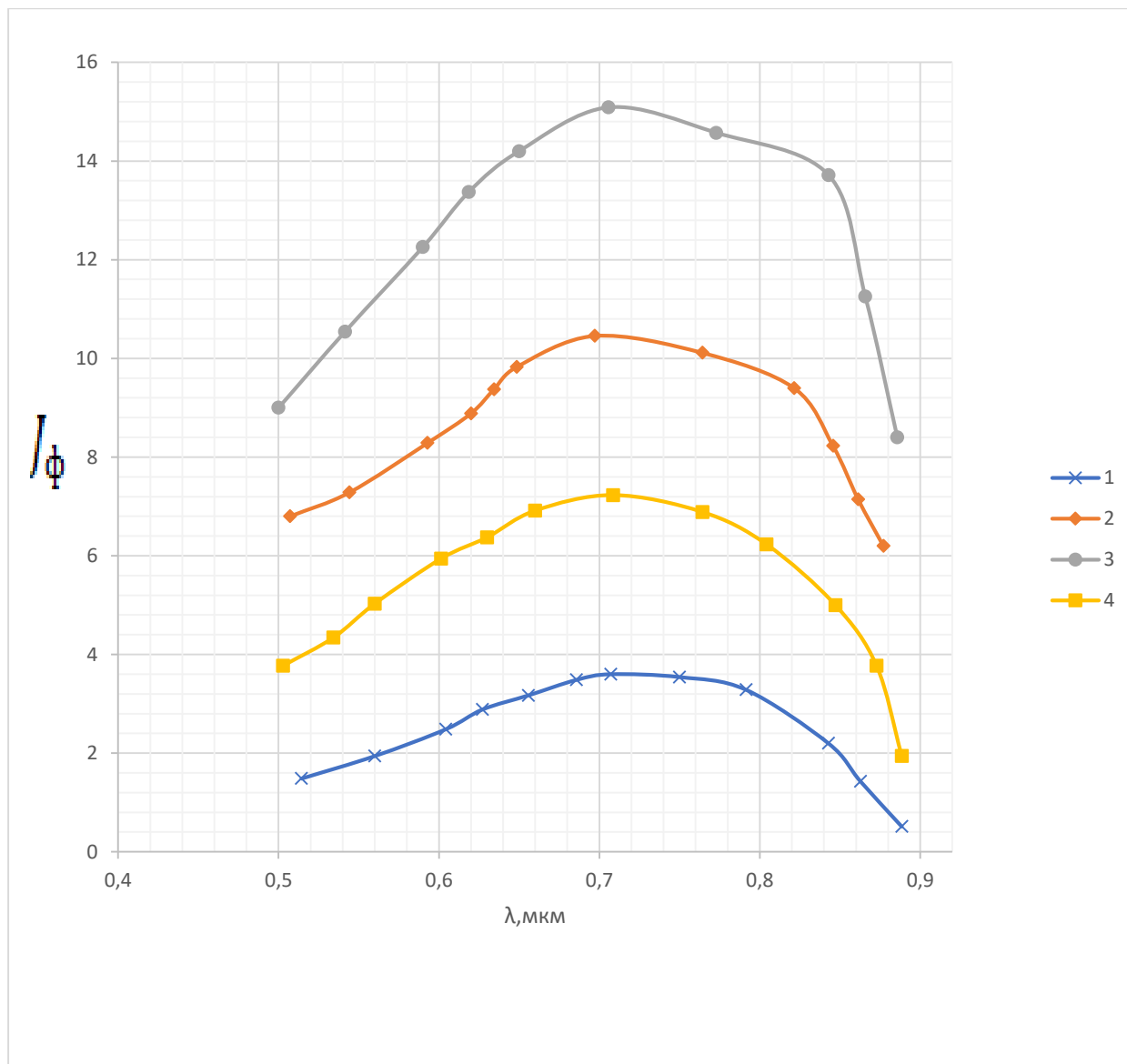


Рисунок 3.6 – Спектральний розподіл фоточутливості нелегованого GaAs : 1 – плоский, 2,3,4 – мікрорельєфний GaAs при різних часах обробки КОН. Час обробки збільшується від 2 до 4 кривої



### 3.3. Оцінка рекомбінаційних параметрів з спектрального розподілу фотопровідності

Відомо, що спектральний розподіл фотопровідності залежить від таких параметрів як коефіцієнт поглинання  $k$ , швидкість поверхневої рекомбінації  $S$ , коефіцієнт дифузії носіїв  $D$ , дифузійна довжина  $L_g$  та ін. і може служити для визначення цих параметрів.

Теорія спектрального розподілу стаціонарної фотопровідності для області сильного поглинання ( $kd \gg 1, kL_g \gg 1$ ) дає такий вираз для фотопровідності

$$\frac{J_\Phi}{\eta} = A \left( 1 + \frac{S}{D} \frac{1}{k} \right) \quad (3.2)$$

де

$$A = \frac{\beta q L_g^2 (1 - R) (\mu_n + \mu_p)}{l \left( D + S L_g \operatorname{cth} \left( \frac{d}{2 L_g} \right) \right)}, \quad (3.3)$$

$l$  – довжина зразка,  $\mu_n$  і  $\mu_p$  – відповідно, рухливості електронів і дірок,  $\beta$  – квантовий вихід внутрішнього фотоефекту. Видно, що залежність  $\frac{J_\Phi}{\eta} = f\left(\frac{1}{k}\right)$  є прямою лінією, що відсікає на осі абсцис відрізок.  $a = -\frac{D}{S}$  можна визначити по відрізка, який відсікається прямою  $\frac{J_\Phi}{H} = f\left(\frac{1}{k}\right)$  по осі ординат :

$$H = \frac{BL_g^2}{D + SLcth \left( \frac{d}{2L_g} \right)}, \quad (3.4)$$

де

$$B = \frac{\beta q(\mu_n + \mu_p)(1 - R)}{l}, \quad (3.5)$$

Однак, для цього необхідно знати абсолютні значення  $J_\Phi, H, \mu_n, \mu_p, \beta, R$ . Останнє легко обійти, якщо вимірювати спектральний розподіл фотопровідності при двох обробках поверхні. Тоді для товстих зразків ( $\frac{d}{L_g} \gg 1$ ) маємо:

$$L_g = \frac{H_1 - H_2}{\frac{H_2}{a} - \frac{H_1}{a}}, \quad (3.6)$$

Інший спосіб визначення дифузійної довжини нерівноважних носіїв струму полягає у визначенні абсциси перетину прямих.

$$\begin{aligned} \frac{J_\Phi}{\eta} &= A \left( 1 + \frac{S}{Dk} \right), \\ \frac{J_\Phi}{H} &= A \left( 1 + \frac{S}{D} \frac{1}{L_g} \right), \end{aligned} \quad (3.7)$$

(випадок  $kd \ll 1$  і  $kL_g \ll 1$ ) Застосування цієї методики до GaAs може викликати заперечення, але так як застосовувався напівізолюючий GaAs, який є

компенсованим напівпровідником то великих помилок при оцінці рекомбінаційних параметрів очікувати не слід.

На рис.3.4 приведені, перебудовані з рис.3.3 залежності  $\frac{J_{\phi}}{\eta} = f\left(\frac{1}{k}\right)$ . Видно, що тенденція зміни залежності  $\frac{J_{\phi}}{\eta} = f\left(\frac{1}{k}\right)$  загальна. Проаналізуємо її тільки для GaAs. На плоскому зразку  $\frac{D}{S} = 8 \cdot 10^{-5}$  см. Після АТ і утворення  $As_2O_3$ ,  $\frac{D}{S} = 18 \cdot 10^{-5}$  см. Це зменшення можна швидше приписати збільшення  $S$ , ніж зменшення  $D$ . У травлення (видалення  $As_2O_3$  і травлення дендритних гілок) збільшується до  $\frac{D}{S} = 30 \cdot 10^{-5}$  см, потім падає до 15. Оскільки це травлення проходить в одному травнику, то можливо для кривої 3 зменшується  $S$  і збільшується  $D$ , а далі швидше припустити, що збільшується  $D$ . Це означає, виходячи зі співвідношення Ейнштейна, що при АТ збільшується рухливість. З рис.3.4 також впливає, що дифузійна довжина трохи зменшується при переході від плоского зразка до мікрорельєфного (від 0,3 мкм до 0,1 мкм), а потім в мікрорельєфному, при травленні дендритних гілок збільшується до 0,4 мкм і на останньому етапі падає майже до плоского зразка.

Ці оцінки показують, що рекомбінаційні параметри анізотропно травленого шару відрізняються від плоских поверхонь, причому ця відмінність змінюється з координатою в мікрорельєфному шарі.

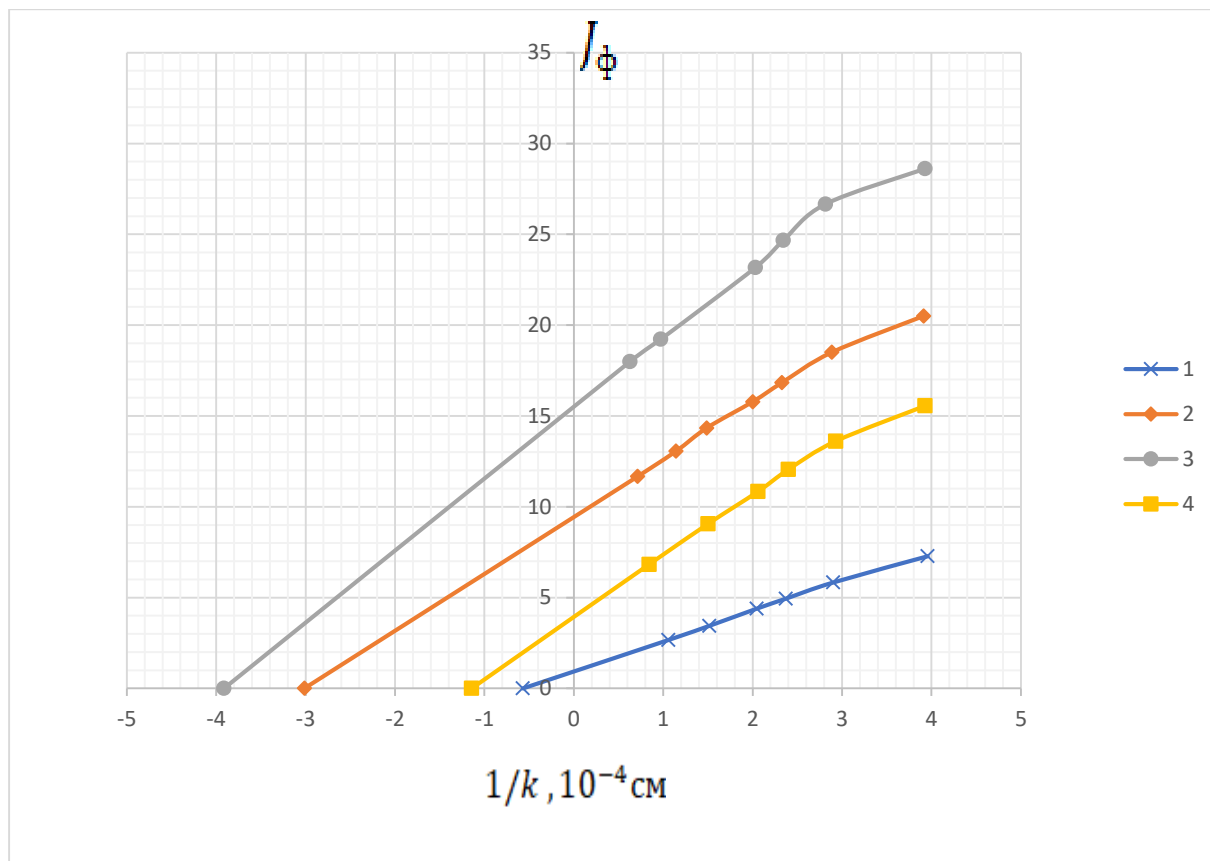


Рисунок 3.7 – Оцінка рекомбінаційних параметрів GaAs

## ВИСНОВКИ

В роботі була розглянута проблема утворення мікрорельєфної поверхні напівпровідників IV групи і сполук  $A^{III}B^V$  і вплив її на фотоелектричні властивості напівпровідників.

При виконанні роботи були отримані наступні результати.

З урахуванням структурно-геометричних і кристалів-хімічних особливостей монокристалів IV групи і  $A^{III}B^V$  напівпровідників розглянута технологія отримання морфології поверхні типу анізотропно травлених мікрорельєфів. Хімічне середовище, що використовується при травленні за своєю природою окислювача може бути кислотної ( $HNO_3, H_2SO_4, FeCl_3$ ) – Ge,  $A^{III}B^V$  напівпровідники, або лужною ( $KOH$ ) – Si. Найбільш універсальним є кисле середовище.

Анізотропно травлений мікрорельєф є кордоном взаємодії структури кристалу і хімічного середовища, наслідком чого є внутрішня зонарно-секторіальна будова. Для Si – правильні тетрагональні піраміди, Ge – тетрагональні піраміди зі списовидною вершиною,  $A^{III}B^V$  – дендритні морфології.

Анізотропно травлені поверхні напівпровідників IV групи і  $A^{III}B^V$  напівпровідників є ефективною пасткою світла і деполяризаторами випромінювання. Вони зменшують дзеркальні компоненти відбиття і пропускання до 1%, загальний відбитий потік до 6%, зміщують криві пропускання в довгохвильову область.

Анізотропно травлені поверхні мають властивості спектральної селективності, що є результатом співвідношення між довжиною хвилі випромінювання і величиною розміру мікрорельєфу.

Мікрорельєфна світлоприймаюча область в  $p-n$  структурах і планарних фоторезисторах збільшує ефективне поле зору фотоприймача до  $\pm 60 - 70^\circ$  порівняно до  $\pm 15 - 20^\circ$  при плоскій області.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Сердобинцев, А.А. Вторично-ионная массспектрометрия фотопроводящих мишеней / А.А. Сердобинцев, А.Г. Роках, С.В. Стецюра, А.Г. Жуков // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, №11. – С. 96–102.
2. Маляр, И. В. Изменение электрофизических характеристик фоточувствительных полупроводников и структур полупроводник – органическое покрытие при модификации их с помощью излучения и отжига: дис. ... кан-та физ.-мат. наук : 05.27.01 / Маляр Иван Владиславович. – Саратов, 2012. – 179 с.
3. Климова, С. А. Электрофизические свойства пленочных фотопроводящих структур на основе CdS со свинцовосодержащим органическим монослойным покрытием: дис. ... кан-та физ.- мат. наук: 05.27.01 / Климова Светлана Александровна. – Саратов, 2010. – 181 с.
4. Роках, А.Г. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках: учебное пособие / А.Г. Роках. – Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 1984. – 158с.
5. Тришенков, М. А. Твердотельная фотоэлектроника: сегодня и завтра / М. А. Тришенков, И. И. Таубкин, А. М. Филачёв // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. - В. 1(224) - С. 31-45.
6. Роуз, А. Основы теории фотопроводимости / А. Роуз. – М.: Мир, 1966. – 189 с.
7. Alaei M.S. A study of the physical properties of sprayed CdS thin films / M.S. Alaei, M.D. Rouhani // J. Electron Mater. – 1979. – 8, №3. – P.289-299.
8. Айнспрук Н. Арсенид галлия в микроэлектронике / Н. Айнспрук. – М.: Мир, 1988, - С. 147.
9. Гавриленко, В.И. Оптические свойства полупроводников: справочник / В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко – Киев: Наукова думка – 1987. – 244с.

10. Майссел, Р. Технология тонких пленок. Справочник / Р. Майссел, Р. Глэнг. – М.: Советское радио, 1977. – С. 391.
11. Rokakh, A. G. Connection of a secondary-ion photoeffect with crystallinity and photoconductivity of some semiconductor compounds / A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, Yu. N. Perepelitsyn, S.B. Venig, M.D. Matasov // *Phys.Express.* – 2013. – Vol. 3, № 2. – P.1-8.
12. Zheng, Jing-Gao, Negative Photoconductivity Induced by surface plasmon polaritons in the Kretschmann configuration / Zheng Jing-Gao, Sun Jia-Lin, Xue Ping // *Chin. Phys. Lett.* – 2011. Vol. 28, No. 12. – P. 1273.
13. Panzer, Matthew J. Tunable infrared emission from printed colloidal quantum dot/polymer composite films on flexible substrates / Matthew J. Panzer, Vanessa Wood, Scott M. Geyer et al. // *Journal of display technology.* – 2010. – Vol. 6, No. 3. – P. 90-93.
14. Электрофизические и оптические свойства пористого кремния. Д. И. Биленко, Н. П. Абанынин, Ю. Н. Галишникова и др. // *ФТП.* – 1983. Т. 17. В. 11. – С. 2090-2092.
15. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., – М.: Мир, 1984, – в 2 т., – 455 с.
16. Стецюра, С.В. Технология и применение гетерогенных структур на основе сульфоселенидов кадмия / С.В. Стецюра, И.В. Маляр, С.Б. Вениг. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2013. – 192 С
17. Аркадьева, Е.Н. Электрические свойства полуизолирующих кристаллов теллурида кадмия, легированных хлором / Е.Н. Аркадьева, О.А. Матвеев. // *Физика и Техника Полупроводников.* – 1976. - Т. 10, № 11. - с. 2153-2156
18. Sigmund P. Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets / P. Sigmund // *Phys. Rev.* - 1969. - Vol. 184. - P. 383.

- 19.Роках, А.Г. Гетерогенный фотопроводник на основе CdS-PbS / А.Г. Роках, А.В. Кумаков, Н.В. Елагина // Физика и Техника Полупроводников. – 1979. - Т. 13, № 4, – С. 787-789
- 20.Viswanathan R. Fully scaled 0.5  $\mu\text{m}$  metal–oxide semiconductor circuits by synchrotron x-ray lithography: mask fabrication and characterization / R. Viswanathan, R. E. Acosta, D. Seeger[et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. — 1988. — Vol. 6, No. 6. — P. 2196–2201.
- 21.Невлюдов И. Ш. Нанолитография- наноимпринтинг [Текст]/ И. Ш. Невлюдов, В. А.Палагин, О. Г. Шинкаренко// НТЖ «Радіотехніка».— 2007 – .№150, С. 151-158.
- 22.Семенець В. В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології Навчальний посібник./ В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін – Харків «Копанія СМІТ», – 2011. – 416 с.
- 23.Невлюдов И.Ш. Технологии микросистемной техники [Текст]/ И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Чалая/– НТЖ «Технология приборостроения», Харьков. – 2014.– № 3, С.7-10.
- 24.Youtsey C., Adesida I., Bulman G. Highly anisotropic photoenhanced wet etching of n - type GaN // Appl. Phys. Lett. –1997. – Vol. 71. – P. 2151–2153.
- 25.Chang C. Y. GaAs high-speed devices / C. Y. Chang, F. Kai. — New York : Wiley, 1994. — 612 p
- 26.Оура, К. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В.Зотов и др. – М: Наука, 2005. – 500с.
- 27.Стецюра, С.В. Влияние параметров узкозонных включений на тип и величину вторичноионного фотоэффекта в гетерофазных фотопроводниках / С.В. Стецюра, И.В. Маляр, А.А. Сердобинцев, С.А. Климова. // Физика и техника полупроводников. – 2009. - Т. 43, № 8, с. 1102-1108.



- 28.. Гавриленко, В.И. Оптические свойства полупроводников: справочник / В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко – Киев: Наукова думка – 1987. – 244с.